«هذا الكتاب بمثابة جوهرة يقدمها لنا روفيلي، فهو ممتع القراءة ويعج بالتشبيهات والاستعارات الرائعة، وأخيرًا وليس آخرًا؛ فهو احتفاء بالروح البشرية.»

مدونة «كوزموس آند كالتشر»
الراديو الوطني العام «إن. بي. آر»

الواقع ليس كما يبدو

رحلة إلى الجاذبية الكمية

كارلو روفيلي

مكتبة ٥٩٣

بوك مانيا

الواقع ليس كما يبدو

مكتبة | 593

الواقع ليس كما يبدو

رحلة إلى الجاذبية الكمية

تأليف
كارلو روفيلي

ترجمة
صفية مختار

مكتبة | 593

بوك مانيا

الواقع ليس كما يبدو
Reality Is Not What It Seems
كارلو روفيلي
Carlo Rovelli

الطبعة الأولى: ٢٠٢٠م
رقم إيداع: ٢٠١٩/١٩٦٥٣م
تدمك: ٩٧٨٩٧٧٨٥٣٦٨٧٤
٢٦٤ ص، ١٤,٥×٢١سم

جمهورية مصر العربية
٦٦ مساكن الرماية، الدور الثالث - شقة ١٠، الهرم، الجيزة

+201099596575
bookmania2017@gmail.com
بوك مانيا - Bookmania
book_mania2017

تصميم وتنفيذ
شركة خطوة

جميع الحقوق محفوظة لشركة بوك مانيا
إنَّ شركة بوك مانيا غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره وإنما يعبّر الكتاب عن آراء مؤلفه. يُمنَع نسخ أو استعمال أي جزء من هذا الكتاب بأية وسيلة تصويرية أو إلكترونية أو ميكانيكية، ويشمل ذلك التصوير الفوتوغرافي والتسجيل على أشرطة أو أقراص مضغوطة أو استخدام أية وسيلة نشر أخرى، بما في ذلك حفظ المعلومات واسترجاعها، دون إذن خطي من الناشر.

Arabic Language Translation Copyright © 2019 Book Mania
Reality Is Not What It Seems
Copyright © 2014 by Carlo Rovelli
All Rights Reserved.

المحتويات

كلمة المؤلف ١١

مقدمة: السير على الشاطئ ١٥

الجزء الأول: الجذور

الفصل الأول: المكونات الأساسية ٢٣

هل هناك حدود للقابلية للانقسام؟ ٣١

طبيعة الأشياء ٣٨

الفصل الثاني: الكلاسيكيات ٤٧

إسحق والقمر الصغير ٤٧

مايكل: الحقول والضوء ٥٨

الجزء الثاني: بداية الثورة

الفصل الثالث: ألبرت ٦٩

الحاضر الممتد ٧٠

أجمل النظريات ٧٨

الرياضيات أم الفيزياء؟ ٩١

الكون ٩٤

الفصل الرابع: الكموم ١٠٧

ألبرت مرة أخرى ١٠٧

نيلز وفيرنر وبول ١١١

المجالات والجسيمات شيء واحد ١٢٢
الكمات ١: المعلومات محدودة..... ١٢٥
الكمات ٢: اللاتحديد ١٢٧
الكمات ٣: الواقع علائقي..... ١٢٩
هل نفهم حقًّا؟..... ١٣٢

الجزء الثالث: الفضاء الكمي والزمن العلائقي

الفصل الخامس: الزمكان كمي **١٣٩**
ماتفي ١٤٢
جون ١٤٥
أولى خطوات الحلقات ١٤٩
الفصل السادس: كمات الفضاء..... **١٥١**
طيف الحجم والمنطقة..... ١٥٣
ذرات الفضاء ١٥٨
شبكات اللف المغزلي ١٦٠
الفصل السابع: الزمان غير موجود..... **١٦٥**
الزمن ليس كما نعتقد ١٦٦
الشمعدان والنبض..... ١٦٨
سوشي الزمكان..... ١٧٢
رغوة اللف المغزلي..... ١٧٥
مم يتكون العالم؟..... ١٨٠

الجزء الرابع: ما وراء المكان والزمان

الفصل الثامن: ما وراء البيج بانج..... **١٨٧**
المعلم ١٨٧

علم الكون الكمي ١٩١
الفصل التاسع: تأكيدات تجريبية؟ **١٩٥**
إشارات من الطبيعة ١٩٨
نافذة على الجاذبية الكمية ٢٠٢
الفصل العاشر: الثقوب السوداء الكمية **٢٠٧**
الفصل الحادي عشر: نهاية اللانهائية **٢١٥**
الفصل الثاني عشر: المعلومات **٢٢٣**
الزمن الحراري ٢٣٣
الواقع والمعلومات ٢٣٦
الفصل الثالث عشر: اللغز **٢٤١**
المراجع **٢٤٩**
الملاحظات **٢٥٥**

«بعض علماء الفيزياء — أو على الأحرى ليس كثير منهم — يجمعون بين الشعر والفيزياء، فهم يرون العالم — أو العالم المادي تحريًا للدقة — كسرد غنائي مكتوب بشفرة خفية يمكن أن يفكها العقل البشري، وكارلو روفيلي عالم الفيزياء والمؤلف الإيطالي واحد من هؤلاء ... فكتاب روفيلي عبارة عن جوهرة، فهو ممتع القراءة ويعج بالتشبيهات والاستعارات الرائعة، وأخيرًا وليس آخرًا، فهو احتفاء بالروح البشرية.»

مدونة «كوزموس آند كالتشر»

الراديو الوطني العام (إن. بي. آر)

«إذا كانت رغبتك في الانبهار بالعالم الذي نعيش فيه تحتاج إلى الإنعاش، فإن كارلو روفيلي عالم الفيزياء الإيطالي جاهز لهذه المهمة.»

مجلة إل

«بالإضافة إلى لغة ونبرة تتسمان بالدفء والحماس، فإن كتاب «دروس سبعة موجزة في الطبيعة» يتسم أيضًا بتوجه إنساني عميق؛ حيث يستخدم كلمات مثل «أنيق» و«جمال» للتحدث عن موضوع قد يبدو دسمًا ومجردًا على نحو يحول دون اختراقه ... وكتاب «الواقع ليس كما يبدو» ينتهج التوجه نفسه على نحو أكبر.»

صحيفة نيويورك

«يستهدف كتاب «الواقع ليس كما يبدو» كلًّا من القارئ العادي ويفيد العالم المعاصر في الوقت نفسه ... يسمح لنا روفيلي بتذوق أو التهام العديد من المعادلات اللذيذة، حسبما تقودنا شهيتنا، فهو لا يتوقع أن يكون الجميع متمكنين من المعادلات

أو بارعين في الرياضيات، لكن المعادلات مقدمة كمقبلات لأولئك الراغبين في أخذ حصتهم كاملة إن جاز التعبير.»

صحيفة نيوز آند أوبزرفر في مدينة رالي

«يكتب روفيلي نثرًا جميلًا وهو يتجول بالقارئ عبر تاريخ «الواقع» ومفهومه وكل ما يعنيه بالنسبة للكون الذي لم يُكتشف بعدُ، وحياتنا أيضًا التي لم تُكتشف بعدُ بالتبعية.»

«يكتب روفيلي بأناقة ووضوح وجاذبية ... إنه كتاب ممتع القراءة ومأدبة فكرية.»

مجلة نيوستيتسمان

«يكتب روفيلي بوضوح بالغ ... فهو يحول فيزياء الكم إلى قصة مترابطة يصوغها في صورة بحث عن «طبقة أساسية» للواقع، من ذرات ديموقريطوس المحددة غير القابلة للانقسام إلى أينشتاين ... توجد طريقتان للتعامل مع ذلك اللغز. إحدى الطرق تتمثل في تجاهل الفيزياء الحديثة برُمَّتها، والطريقة الثانية تتمثل في محاولة فهم ما تستطيع قدر الإمكان واختيار أفضل مرشد لك، وبالنسبة لمن يختارون الطريقة الثانية، فلا يوجد مرشد أفضل من روفيلي يمكن اختياره.»

صحيفة التايمز (لندن)

«إن لغة روفيلي الشاعرية، وفكره الواضح، وشغفه للعلم، وتاريخ العلم يجعل الكتاب ممتع القراءة (وإن كانت قراءة بطيئة)، بالإضافة إلى أن المخططات والحواشي السفلية ستجعل القارئ يفهم الموضوع على نحو أفضل ويتعامل بمستوى أكثر خبرة.»

مجلة بوكليست

«ينقل روفيلي بسلاسة الاختلافات بين المعتقد والدليل ... علاوة على ذلك، فإن حماسه معدي ويستمتع بقدرة العقل البشري على الفهم.»

مجلة بابليشرز ويكلي

«مغامرة مدهشة إلى الحدود الخارجية للكون وإلى أصغر الذرات ... يستطيع روفيلي تبسيط الأفكار المعقدة المثبتة إلى مفاهيم أصغر أسهل في الفهم، بحيث يستطيع الأشخاص الذين لا يمتلكون خلفية علمية على الإطلاق — أو يمتلكون قدرًا ضئيلًا منها — أن يفهموا الأفكار الأساسية ... إن حماس روفيلي المعدي والإثارة التي يتحدث بها عن الموضوع يرافقان القارئ حتى في أصعب الجوانب، مما يسمح للمرء أن يحلق بخياله ... إنه وصف مثير لتطور الفيزياء يأخذ القراء إلى حافة معرفة البشر بالكون.»

شيلف أوورنيس للنشر

كلمة المؤلف

على مدار حياتي البحثية برمتها لطالما طالبني الأصدقاء والأشخاص الفضوليون بشرح ما يدور في مجال أبحاث فيزياء الكم، وتساءلوا كيف كان ممكنًا دراسة طرق تفكير جديدة في المكان والزمان؟ وطُلِب مني مرارًا وتكرارًا كتابة عملًا مبسطًا للعامة عن هذه الأبحاث، وعلى الرغم من وجود الكثير من الكتب التي تتحدث عن العلوم الكونية أو نظرية الأوتار، فإنه لا يوجد بعدُ كتاب يتحدث عن أبحاث الطبيعة الكمية للمكان والزمان، والجاذبية الكمية الحلقية بالتحديد، ولطالما ترددت لأنني أردت التركيز على أبحاثي، ومنذ بضع سنوات، بعد أن أكملت كتابي التقني عن هذا الموضوع، شعرت أن الأعمال الجماعية لكثير من العلماء قد دفعت الموضوع إلى مرحلة ناضجة على نحو يكفي لتناوله في كتاب مبسط للعامة، إن المجال الذي نستكشفه ساحر، فلماذا نبقيه خفيًّا عن الناس؟

ورغم ذلك فقد أجَّلت المشروع؛ لأنني لم أتمكن من «رؤية» الكتاب في ذهني، فكيف يمكن أن أشرح عالمًا خاليًا من المكان والزمان؟ وذات ليلة عام ٢٠١٢ عندما كنت أقود السيارة وحيدًا من إيطاليا إلى فرنسا، أدركت أن السبيل الوحيد لشرح التعديلات المستمرة الطارئة على فكرتَي: المكان والزمان بطريقة مفهومة هو رواية القصة من البداية، بداية من ديموقريطوس ووصولًا إلى كمات الفضاء، وعلى أية حال، فهذه هي الطريقة التي فهمت بها القصة، بدأت في تصميم الكتاب بأكمله في ذهني أثناء القيادة، وازداد حماسي إلى أن سمعت صافرات سيارات الشرطة تخبرني بالتوقف؛ فلقد كنت أقود السيارة متجاوزًا السرعة المحددة، وسألني بأدب رجال الشرطة

الإيطاليون إذا ما كنت مجنونًا لأقود بهذه السرعة، وشرحت لهم أنني وجدت للتو الفكرة التي كنت أبحث عنها منذ وقت طويل؛ وسمح لي رجال الشرطة بالمغادرة دون تحرير مخالفة، وتمنوا لي التوفيق في تأليف الكتاب، وهذا هو الكتاب.

كُتِب هذا الكتاب ونُشِر لأول مرة باللغة الإيطالية في بداية عام ٢٠١٤، وبعد ذلك بفترة وجيزة، كتبت عدة مقالات عن الفيزياء الأساسية في صحيفة إيطالية، وطلب مني ناشر إيطالي مرموق يُدْعَى «أدلفي» كتابة نسخة مطولة من هذه المقالات لتظهر في صورة كتيب صغير، وكان هذا هو أصل الكتاب القصير المسمى «دروس سبعة موجزة في الطبيعة»، وكان من دهشتي الكبيرة أن أصبح هذا الكتاب من الكتب الأفضل مبيعًا حول العالم، وأتاح فرصة جميلة للتواصل بيني وبين كثير من القراء الرائعين حول العالم، ولذلك فإن كتاب «دروس سبعة موجزة في الطبيعة» قد كُتِبَ «بعد» هذا الكتاب، وتعتبر هذه الدروس إلى حد ما توليفة من بعض الموضوعات التي ستجدونها في هذا الكتاب، وإذا كنت قد قرأت كتاب «دروس سبعة موجزة في الطبيعة» وترغب في معرفة المزيد والإبحار على نحو أعمق في هذا العالم الغريب الذي وصفه ذلك الكتاب، فيمكنك أن تجد المزيد بين طيَّات هذا الكتاب.

وعلى الرغم من أنني في هذا الكتاب أتناول الفيزياء التقليدية من الزاوية الغريبة التي أفهمها منها، إلَّا أن هذا التناول غير مثير للجدل إلى حد كبير، ورغم ذلك، فإن الجزء الذي يتناول الأبحاث الحالية في الجاذبية الكمية يعبر عن فهمي الشخصي لأحدث التطورات، فهذه هي المنطقة الحدودية بين ما فهمناه وبين ما لم نفهمه بعدُ، وما زالت هذه المنطقة بعيدة عن تحقيق الإجماع عليها، وسوف يتفق مع ما كتبته في هذا الكتاب بعض من زملائي علماء الفيزياء، بينما لن يتفق معي البعض الآخر، وهذا ينطبق على كل عروض الأبحاث المستمرة في آخر التطورات المعرفية، لكنني أفضِّل أن أقول ذلك بصراحة وبوضوح، هذا الكتاب لا يتحدث عن المؤكدات، بل هو كتاب عن مغامرة المضي قدمًا نحو المجهول.

وفي العموم، هذا كتاب رحلات يصف واحدة من أروع الرحلات التي قامت بها الإنسانية؛ إنها رحلة نرتحل فيها بعيدًا عن تصوراتنا المحدودة وضيقة النطاق عن الواقع، لنصل إلى فهم متزايد الاتساع عن بنية الأشياء، إنها رحلة سحرية بعيدًا عن منظورنا البديهي للأشياء، وبعيدة عن الكمال.

مارسيليا، ٤ مايو ٢٠١٦

مقدمة

السير على الشاطئ

مكتبة
t.me/t_pdf

إننا مهووسون بأنفسنا، فنحن ندرس ما «يخصنا» من تاريخ وعلم نفس وفلسفة وآلهة، وكثير من معرفتنا تدور حول الإنسان نفسه كما لو كنا أهم شيء في الكون، أعتقد أنني أحب الفيزياء لأنها تفتح نافذة يمكننا من خلالها رؤية المزيد، أشعر أن الفيزياء كالهواء الطلق الذي يدخل المنزل.

وما نراه في الخارج عبر النافذة يفاجئنا باستمرار، لقد علمنا أمورًا كثيرة عن الكون، وأدركنا على مر القرون كم كان لدينا الكثير من الأفكار الخاطئة، فلقد كنا نعتقد أن الأرض مسطحة وأنها المركز الثابت لعالمنا، وظننا أن الكون صغير ولا يتغير، واعتقدنا أن الإنسان سلالة منفصلة لا تمت بصلة قرابة للحيوانات الأخرى، وعلمنا بوجود الكواركات والثقوب السوداء وجسيمات الضوء وموجات الفضاء والبنى الجزيئية المدهشة في كل خلية من خلايا أجسامنا، فالجنس البشري يشبه طفل في طور النمو يكتشف في دهشة أن العالم لا يتكون فحسب من غرفة نومه وملعبه، بل هو فسيح يعج بأمور كثيرة يحتاج لاكتشافها وأفكار لا تُعَدُّ ولا تُحْصَى مختلفة تمامًا عن تلك الأفكار التي بدأ بها، إن الكون متعدد الأشكال ولا متناهٍ، وما زلنا نكتشف مصادفةً سمات جديدة فيه، وكلما عرفنا المزيد عن العالم زاد اندهاشنا من تنوعه وجماله وبساطته.

إلا أننا كلما اكتشفنا أمورًا عن الكون أصبحنا أكثر إدراكًا لحقيقة أن ما لا نعلمه يفوق ما نعلمه، وكلما ازدادت قوة التلسكوبات بَدَت السماوات التي نراها أكثر غرابة وأكثر إدهاشًا، وكلما نظرنا عن كثب للتفاصيل الدقيقة

للمادة اكتشفنا المزيد عن بنيتها العميقة، في الوقت الحاضر لا نهتم تقريبًا إلا بنظرية البيج بانج، ذلك الانفجار العظيم الذي نتجت عنه كل المجرات منذ ١٤ مليار سنة، ورغم ذلك فقد بدأنا بالفعل نرى شيئًا وراء هذا الانفجار العظيم، لقد عرفنا أن الفضاء منحني، لكننا نتوقع بالفعل أن يكون هذا الفضاء نفسه منسوجًا من حبيبات كمية مهتزة.

ما زالت معرفتنا بالقواعد الأساسية للعالم في طَوْر النمو، وإذا حاولنا أن نجمع ما تعلمناه عن العالم المادي على مدار القرن العشرين فسوف تشير الدلالات إلى أمر مختلف جذريًّا عما تعلمناه في المدارس، بدأ في الظهور بنية أساسية للعالم ناتجة عن العديد من الأحداث الكمية التي ينعدم عندها الزمان والمكان، تسحب الحقول الكمومية المكان والزمان والمادة والضوء وتبدل المعلومات بين كل حدث وآخر، الواقع شبكة مكونة من أحداث شديدة التفاصيل، فبين كل حدث وآخر يذوب المكان والزمان والمادة والطاقة في سحابة من الاحتمالية.

هذا العالم الجديد الغريب ينبثق حاليًّا بخطوات بطيئة من دراسة السؤال المفتوح الأساسي المطروح في الفيزياء الأساسية المتمثل في الجاذبية الكمية، إنها مسألة الدمج السلس بين ما تعلمناه عن العالم وبين أبرز اكتشافين في فيزياء القرن العشرين المتمثلين في النسبية العامة ونظرية الكم، ويتناول هذا الكتاب جاذبية الكم والعالم الغريب الذي تكشفه الأبحاث المتعلقة بهذا المجال.

هذا الكتاب تغطية حية للأبحاث المستمرة المتمثلة فيما نتعلمه، وما نعلمه بالفعل، وما نعتقد أننا بدأنا في فهمه عن الطبيعة الأساسية للأشياء، يبدأ الكتاب من الأصل البعيد لبعض الأفكار الأساسية التي نستخدمها اليوم لترتيب فهمنا للعالم، ويصف الكتاب اكتشافين من أعظم اكتشافات القرن العشرين، ألا وهما النسبية العامة لأينشتاين وميكانيكا الكم، ويحاول الكتاب التركيز على جوهر المحتوى الفيزيائي للاكتشافين، يصف الكتاب

صورة العالم النابعة حاليًا من أبحاث جاذبية الكم، ويضع في اعتباره أحدث ما قدمت الطبيعة من مؤشرات تمثلت في تأكيد قمر «بلانك» الصناعي لصحة النموذج المعياري الكوني، وفشل مختبر منظمة الأبحاث النووية الأوروبية «سيرن» في رصد الجسيمات فائقة التماثل التي توقعها الكثيرون، علاوة على ذلك، يناقش الكتاب عواقب الأفكار التالية: بنية الفراغ شديدة التفصيل، واختفاء الزمن بمقدار قليل، وفيزياء انفجار البيج بانج العظيم، وأصل حرارة الثقب الأسود، وصولًا إلى دور المعلومات في تأسيس الفيزياء.

في الباب السابع من كتاب «الجمهورية» يروي أفلاطون أسطورة شهيرة عن رجال كانوا مقيدين في قاع كهف مظلم ولا يرون إلا ظلالًا على الجدار تلقيها النار من خلفهم، وكان هؤلاء الرجال يعتقدون أن ما يرونه هو الواقع، وتحرر أحدهم من أغلاله وترك الكهف واكتشف ضوء الشمس والعالم الفسيح، في البداية أذهله ضوء الشمس الذي لم يَعْتَدْه وأصابه بالحيرة، إلا أنه تمكن في النهاية من الرؤية وعاد إلى رفاقه متحمسًا وأخبرهم بما رآه، وكان من الصعب عليهم تصديق ذلك.

إننا في أعماق الكهف مقيدون بجهلنا وأهوائنا، وحواسنا الضعيفة لا تكشف لنا إلا الظلال، وإذا ما حاولنا النظر بعيدًا فسوف نصاب بالحيرة؛ لأننا لسنا معتادين على ذلك، لكننا نحاول وهذا هو دور العلم، فالتفكير العلمي يستكشف العالم ويعيد رسمه، ويقدم لنا تدريجيًّا صورًا أفضل عن العالم، ويعلمنا أن نفكر بطرق أكثر فعالية، فالعلم استكشاف مستمر لطرق التفكير، وتكمن قوة العلم في قدرته الحالمة على تحطيم الأفكار مسبقة التصور ليكشف لنا عن مناطق جديدة من الواقع، ويكون صورًا جديدة وأكثر فعالية عن العالم، تقوم هذه المغامرة على معرفتنا الماضية بأكملها، إلا أن التغيير هو جوهرها، فالعالم لا حدود له ومتغير الألوان، ومن ثم فإننا نرغب في الذهاب لمشاهدته، إننا غارقون في غموضه وجماله، ولا يزال في

الأفق بقعة غير مستكشفة، إن معرفتنا غير الكاملة وغير المؤكدة التي تمثل الشك الممتد على هاوية الأمور الكثيرة التي لا نعلمها، لا تجعل الحياة خالية من المعنى بل تجعلها مثيرة وقيِّمة.

كتبت هذا الكتاب لأروي ما أجده أعجوبة في هذه المغامرة، لقد ألَّفت هذا الكتاب وفي ذهني قارئ معين يتمثل في شخص لا يعرف إلا القليل أو ربما لا يعلم شيئًا عن فيزياء وقتنا الحاضر، لكن فضوله يدفعه لاكتشاف ما نعرفه، وما لم نفهمه بعدُ عن النسيج الأساسي للعالم ووجهتنا البحثية، وكتبت هذا الكتاب محاولًا التعبير عن الجمال الأخاذ لبانوراما الواقع الذي يمكن رؤيته من هذا المنظور.

بالإضافة إلى ذلك، فلقد كتبت هذا الكتاب من أجل زملائي ورفاق الدرب المنتشرين حول العالم، وكذلك من أجل الشابات والشبان الشغوفين بالعلم المتحمسين للانطلاق في هذه الرحلة لأول مرة، سعيت إلى تحديد المظهر العام لبنية العالم المادي المبين من خلال ضوء كل من النسبية وفيزياء الكم، ولأوضح كيف يمكن الجمع بينهما، إن هذا الكتاب لا يقوم فحسب على الإفصاح، بل يقدم أيضًا وجهة نظر في مجال بحثي قد يجعل فيه تجريد اللغة التقنية الرؤية واسعة الزاوية غامضة في بعض الأحيان، فالعلم يتكون من تجارب وافتراضات ومعادلات وحسابات ونقاشات طويلة، لكنها مجرد أدوات مثل آلات الموسيقيين، ففي النهاية ما يهمُّ هو الموسيقى نفسها، والمهم في العلم هو الفهم الذي يقدمه لنا العلم عن العالم، ولفهم أهمية اكتشاف دوران الأرض حول الشمس ليس من الضروري اتباع حسابات كوبرنيكوس المعقدة، ولفهم أهمية اكتشاف أن كل الكائنات الحية على ظهر الكوكب تنحدر من الأسلاف نفسها لا يلزم اتباع النقاشات المعقدة المذكورة في كتب داروين، فالعلم يتمثل في فهم العالم من خلال وجهة نظر تتسع تدريجيًّا.

يقدم هذا الكتاب سردًا للوضع الراهن للبحث عن صورة جديدة

للعالم كما أفهمه في وقتنا الحاضر، إنه الجواب الذي قد أعطيه لزميل أو لصديق يسألني: «إذًا، في رأيك ما هي الطبيعة الحقيقية للأشياء؟» أثناء سيرنا على الشاطئ في مساء طويل في منتصف فصل الصيف.

الجزء الأول
الجذور

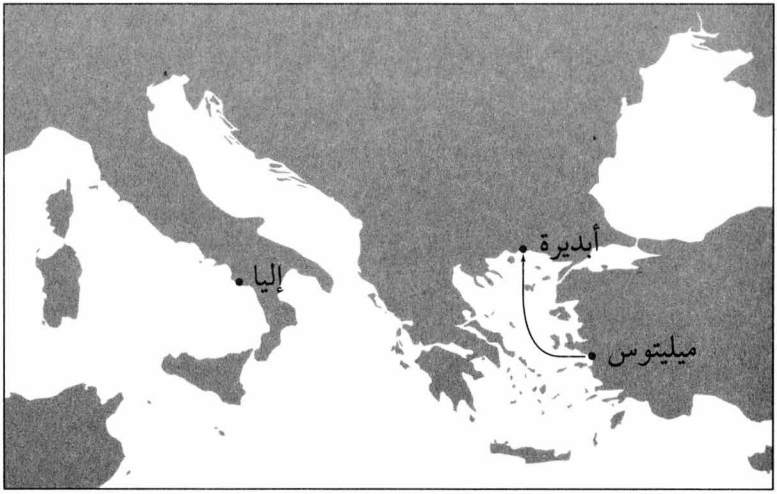
يبدأ هذا الكتاب في ميليتوس قبل ستة وعشرين قرنًا، وقد تتساءلون لماذا يبدأ كتاب عن فيزياء الكم بالحديث عن أحداث وأشخاص وأفكار بهذا القِدَم؟ وآمل ألا يؤاخذني على ذلك القارئ المتحمس لفهم كموم المكان، والسبب في ذلك أنه من الأسهل فهم الأفكار من خلال البدء بالجذور التي نشأت منها، فضلًا عن أن عددًا كبيرًا من الأفكار التي اتضح أنها فعَّالة في فهم العالم قد نشأ منذ ما يزيد عن ألفَي سنة، وإذا تتبعنا نشأة تلك الأفكار باختصار فسوف تصبح أكثر وضوحًا، وستصبح الخطوات التالية أكثر بساطة وطبيعية.

ورغم ذلك فثمة أسباب أخرى، فمشكلات معينة ظهرت لأول مرة في العصور القديمة ما زالت ضرورية لفهم العالم، وتستخدم بعض الأفكار الحديثة المتعلقة ببنية المكان مفاهيم وموضوعات قُدِّمَت في تلك العصور، وعند الحديث عن هذه الأفكار البعيدة أطرح على الطاولة أسئلة ستكون محورية في الجاذبية الكمية، بالإضافة إلى ذلك، فعند تناول الجاذبية الكمية ستمكننا من التمييز بين الأفكار التي تعود إلى أصل التفكير العلمي، — حتى وإن كانت تلك الأفكار غير مألوفة بالنسبة لنا — وبين الأفكار الجديدة كليًّا، وكما سنرى؛ فإن الرابط بين المشاكل التي واجهها علماء العصور القديمة والحلول التي قدمها أينشتاين والجاذبية الكمية وثيق على نحو مدهش.

الفصل الأول
المكونات الأساسية

وفقًا للتراث فإنه في عام ٤٥٠ قبل الميلاد ركب رجل سفينة مسافرة من ميليتوس إلى أبديرة، وكان مقدر لهذه الرحلة أن تكون رحلة مصيرية لتاريخ المعرفة.

كان هذا الرجل على الأرجح يفر من اضطراب سياسي في ميليتوس، حيث استعادت الطبقة الأرستوقراطية السلطة بعنف، وكانت ميليتوس مدينة إغريقية مزدهرة ومنتعشة، بل ربما كانت المدينة الرئيسية في العالم الإغريقي قبل العصر الذهبي لمدينتَي: أثينا وأسبرطة، لقد كانت مركزًا تجاريًّا مزدحمًا



الشكل (١-١): الرحلة التي قام بها ليوكيبوس الميليتوسي، مؤسس المدرسة الذرية (تقريبًا في عام ٤٥٠ قبل الميلاد).

يسيطر على شبكة تضم ما يقرب من مائة مستعمرة ومنفذ تجاري يمتدون من البحر الأسود حتى مصر، كانت القوافل التجارية القادمة من بلاد الرافدين والسفن القادمة من كل أنحاء البحر المتوسط تصل إلى ميليتوس ومن ثم كانت تتناقل الأفكار.

أثناء القرن الماضي كان قد حدث في ميليتوس ثورة فكرية سيتضح أنها كانت ضرورية للبشرية، فقد أعادت مجموعة من المفكرين صياغة طريقة طرح الأسئلة المتعلقة بالعالم، وطريقة البحث عن الأجوبة، وكان أناكسيماندر أعظم هؤلاء المفكرين.

منذ زمن سحيق، أو على الأقل منذ أن تركت لنا البشرية نصوصًا مكتوبة توارثناها، سأل البشر أنفسهم كيف وُجِدَ العالم، وممَّ يتكون، وكيف نُظِّمَ، ولماذا تحدث الظواهر الطبيعية، وعلى مدار آلاف السنوات أعطوا أنفسهم أجوبة متشابهة، وكانت هذه الأجوبة تشير إلى قصص معقدة عن أرواح وآلهة ومخلوقات خيالية وأسطورية، وما شابه ذلك من أمور؛ فمن ألواح الكتابة المسمارية إلى النصوص الصينية القديمة، ومن الكتابة الهيروغليفية في الأهرامات إلى أساطير قبائل السو، ومن النصوص الهندية بالغة القدم وصولًا إلى الكتاب المقدس، ومن القصص الإفريقية إلى قصص الأستراليين الأصليين. لم تكن هذه القصص سوى فيض مثير لكن ممل نسبيًّا في جوهره يحكي عن أفاعي مجنحة وأبقار مقدسة، وآلهة سريعة الغضب أو ميالة للخصومة أو طيبة خلقت العالم بالنفخ من الأعماق السحيقة قائلة «ليكن نور»، أو بإخراجه من بيضة حجرية.

وبعد ذلك في بداية القرن الخامس قبل الميلاد، وجد طاليس في ميليتوس وتلميذه أناكسيماندر وهكتيوس ومدرستهم طريقة مختلفة للبحث عن أجوبة، وفتحت هذه الثورة الفكرية الهائلة نوعًا جديدًا من المعرفة والفهم، وتمثل الفجر الأول للتفكير العلمي.

أدرك مفكرو ميليتوس أنه عند استخدام المراقبة والمنطق بذكاء بدلًا

من البحث عن الأجوبة في الخيال أو في الأساطير القديمة أو في الدين، وفوق ذلك أنه باستخدام التفكير النقدي بطريقة تمييزية يمكن تصحيح رؤيتنا للعالم على نحو متكرر، ويمكن اكتشاف جوانب جديدة من الواقع تخفى عن النظرة العادية، وأنه من الممكن اكتشاف الجديد.

ولعل الاكتشاف الحاسم كان طريقة التفكير المختلفة التي لم تجعل التلميذ مرغمًا على احترام أفكار معلمه ونشرها، بل منحته حرية الاستفادة من هذه الأفكار دون الخوف من ترك الجزء الذي يمكن تحسينه أو انتقاده، إنها طريقة وسطى جديدة تقع ما بين الالتزام الكامل بالمدرسة الفكرية والاستنكار العام للأفكار، إنها أساس التطور اللاحق في التفكير الفلسفي والعلمي؛ فمنذ هذه اللحظة بدأت المعرفة تزداد بسرعة هائلة معتمدة على معرفة الماضي وإمكانية الانتقاد في الوقت نفسه، مما سمح بتحسين المعرفة والفهم، وتمثل «الافتتاحية» المدهشة للكتاب الذي ألَّفه هكتيوس عن التاريخ جوهر هذا التفكير النقدي الذي ينطوي بطبيعة الحال على إدراك احتمالية الخطأ، حيث قال: «أكتب الأمور التي تبدو صحيحة بالنسبة لي؛ لأن روايات الإغريق تبدو مليئة بالتناقض والأمور السخيفة.»

ووفقًا للأسطورة، فقد نزل هرقل إلى الإله هاديس من كيب تينارو، فزار هكتيوس كيب تينارو، وقرر أنه في واقع الأمر لا يوجد ممر تحت الأرض أو أي وسيلة للوصول إلى الإله هاديس في هذه البقعة، ومن ثم حكم بأن الأسطورة زائفة، وهذا يمثل فجر عصر جديد.

كان هذا الأسلوب المعرفي الجديد سريعًا وفعالًا، ففي غضون سنوات قليلة، فهم أناكسيماندر أن الأرض تسبح في السماء، وأن السماء ممتدة تحت الأرض، وأن ماء المطر يأتي من تبخُّر الماء على الأرض، وأن تنوع المواد في العالم لا بد أن يفهم في ضوء مكون واحد موحد وبسيط أطلق عليه «الأبيرون»، أي اللامحدد، وأن الحيوانات والنباتات تطورت وتكيفت مع التغيرات البيئية، وأن الإنسان لا بد أنه قد تطور من الحيوانات، ومن ثم

تكوَّن تدريجيًّا أساس قواعد فهم العالم التي ما زالت تمثل في جوهرها فهمنا الحالي.

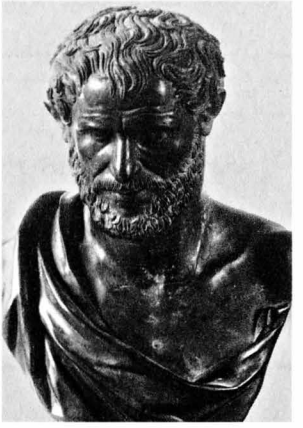
لما كانت ميليتوس تقع في نقطة التقاء بين الحضارة الإغريقية والإمبراطوريات القديمة المتمثلة في إمبراطورية بلاد الرافدين والإمبراطورية المصرية، ولما كانت تثريها معرفتها وإن كانت غارقة في الحرية والحراك السياسي الإغريقي المعتاد، ولما كانت ساحة اجتماعية خالية من القصور الإمبراطورية أو الطبقات الكهنوتية القوية يناقش فيها المواطنون مصائرهم في ساحات مفتوحة، فقد كانت ميليتوس المكان الذي قرر فيه البشر لأول مرة قوانينهم جماعيًّا، وأول مكان ينعقد فيه أول برلمان في تاريخ العالم «البانيونيوم» — مكان التقاء مفوضي العصبة الأيونية — والمكان الذي شك فيه البشر لأول مرة في أن الآلهة وحدها هي المسئولة عن تفسير ألغاز العالم، فمن خلال المناقشة من الممكن الوصول لأفضل قرارات للمجتمع، ومن خلال المناقشة من الممكن فهم العالم، هذا هو التراث الهائل لمدينة ميليتوس مهد الفلسفة والعلوم الطبيعية والدراسات الجغرافية والتاريخية، وليس من المبالغة قول: إن التراث العلمي والفلسفي برمته في البحر المتوسط ثم في العصر الحديث، تعود جذوره في الأساس إلى تخمينات مفكري ميليتوس في القرن السادس قبل الميلاد.[١]

إلا أن تنوير ميليتوس سرعان ما انتهى نهاية مأساوية، فلقد أدى وصول الإمبراطورية الفارسية، وفشل الثورة المناهضة للإمبراطورية إلى تدمير عنيف للمدينة عام ٤٩٤ قبل الميلاد واستعباد عدد كبير من سكانها، وفي أثينا كتب الشاعر فرينيكوس مسرحية مأساوية بعنوان «الاستيلاء على ميليتوس» التي أثرت كثيرًا في سكان أثينا لدرجة حظر إعادة عرضها؛ لأنها تسبب الكثير من الحزن، ورغم ذلك، فبعد عشرين عامًا تمرد الإغريق على الخطر الفارسي، وعادت ميليتوس من جديد وعاد سكانها وعادت مركزًا للتجارة والأفكار تشع فكرًا وروحًا مرةً أخرى.

لا بد أن الشخص الذي بدأنا الفصل بالحديث عنه قد تأثر بهذه الروح عندما سافر من ميليتوس عام ٤٥٠ إلى أبديرة حسبما ذكر التراث، كان اسمه ليوكيبوس؛ ولا يُعرَف عن حياته الكثير.[٢] ألَّف ليوكيبوس كتابًا أسماه «علم الكونيات الكبير»، وعند وصوله إلى أبديرة أسس مدرسةً علمية وفلسفية سرعان ما ألحق بها تلميذًا شابًّا يُدعَى ديموقريطوس، وقُدِّرَ لهذا الشاب أن يمتد تأثيره على فكر كل من جاء بعده في الأزمنة التالية.

وتعاون المفكران في تأسيس المدرسة الذرية القديمة المهيبة، وكان ليوكيبوس هو المعلم، وكان ديموقريطوس هو التلميذ النجيب الذي كتب العديد من المؤلفات عن كل صنوف المعرفة، وحظي بتبجيل هائل في العصور القديمة التي كان فيها الناس مطلعين على هذه الأعمال، وقد قال عنه سينيكا: «الأكثر دهاءً في الأقدمين»،[٣] وقال عنه شيشرون متسائلًا: «من يمكن مقارنته بعظمته ليس فقط بسبب عبقريته بل أيضًا بسبب روحه؟»[٤]

فما الذي اكتشفه ليوكيبوس وديموقريطوس بعد ذلك؟ لقد أدرك أهل ميليتوس أن العالم يمكن فهمه باستخدام المنطق، وأصبحوا مقتنعين أن تنوع الظواهر الطبيعية لا بد أن يكون راجعًا إلى شيء بسيط، وحاولوا أن يفهموا ماهية ذلك الشيء المحتمل، وكوَّنوا تصورًا عن مادة أولية صُنِعَ منها كل شيء، لقد تصور أنكسيمانس وغيره من أهل ميليتوس أن هذه المادة يمكن أن تنضغط وتقل كثافتها، ومن ثم تتحول من عنصر إلى آخر من العناصر التي يتكوَّن منها العالم، لقد كانت أول بذرة فيزيائية، ورغم كونها بدائية وأولية لكنها كانت في الاتجاه الصحيح، كان هناك حاجة إلى فكرة كبيرة



الشكل (١-٢): ديموقريطوس الأبديري.

ورؤية كبيرة لفهم النظام الخفي للعالم، وتوصل ليوكيبوس وديموقريطوس لهذه الفكرة.

وتتسم فكرة نظام ديموقريطوس بالبساطة الشديدة فهي تقضي بأن الكون كله مكوَّن من فضاء لا حدود له يسبح فيه عدد هائل من الذرات، وهذا الفضاء لا حدود له، فليس فوقه شيء أو تحته شيء، وليس له مركز أو حد، وهذه الذرات لا صفات لها على الإطلاق إلا أشكالها، ولا وزن لها ولا لون ولا مذاق، «الحلو هو حلو بالإجماع، والمر هو مر بالإجماع، والساخن هو ساخن بالإجماع، واللون هو لون بالإجماع، لكن في الحقيقة توجد ذرات وخواء.»[٥]

الذرات غير قابلة للانقسام، فهي المكونات الأساسية للواقع، ولا يمكن تقسيمها لأجزاء أصغر، وكل شيء يتكون منها، تتحرك الذرات بحرية في الفضاء وتتصادم مع بعضها البعض، وتتعلق إحداها بالأخرى وتدفع وتجذب بعضها البعض، وتتجاذب الذرات المتشابهة وتندمج.

هذا هو النسيج المكون للعالم، هذا هو الواقع، وكل شيء سواه هو مجرد نتيجة فرعية عشوائية وعرضية لحركة واندماج الذرات، إن التنوع المطلق للمواد التي يتكون منها العالم يأتي فقط من اندماج الذرات.

عندما تتجمع الذرات يكون الأمر الوحيد المهم والأمر الوحيد الموجود على المستوى الأولي هو شكل هذه الذرات وترتيبها ونظام تجمعها، فمثلما قد يؤدي تجميع حروف الألفبائية بطرق مختلفة إلى الحصول على مسرحيات كوميدية أو تراجيدية، أو على قصص سخيفة أو قصائد ملحمية، فإن الذرات الأساسية تندمج لتكون العالم بتنوعه اللانهائي، هذه الاستعارة من تأليف ديموقريطوس.[٦]

لا يوجد نهائية أو غرض في هذا الرقص اللانهائي للذرات، إننا مثل بقية العالم الطبيعي لسنا إلا منتجًا واحدًا من المنتجات الكثيرة لهذا الرقص اللانهائي، وهذا المنتج ناتج عن تجمع عرضي، تستمر الطبيعة في التجريب

باستخدام الأشكال والبنى التركيبية، ونحن مثلنا مثل الحيوانات لسنا إلا نتاج انتقاء عشوائي وعارض على مر دهور سحيقة من الزمن، حياتنا عبارة عن تجمع للذرات؛ فأفكارنا مكونة من ذرات رفيعة، وأحلامنا نتاج الذرات؛ وآمالنا وعواطفنا مكتوبة بلغة مكونة من تجمعات الذرات؛ والضوء الذي نراه مكون من ذرات تجلب لنا الصور، والبحار مكونة من الذرات، وكذلك مدننا والنجوم، إنها رؤية هائلة لا حدود لها، وبسيطة على نحو مذهل وقوية على نحو لا يُصَدَّق، سيُبْنَى عليها لاحقًا معرفة الحضارة.

على هذا الأساس كتب ديموقريطس الكثير من الكتب التي تتحدث عن نظام واسع يتناول مسائل في الفيزياء والفلسفة والأخلاق والسياسة وعلم الكونيات، وكتب أيضًا عن طبيعة اللغة وعن والدين وعن أصول المجتمعات البشرية، بالإضافة إلى أمور أخرى كثيرة، (علاوة على ذلك، فإن افتتاحية كتابه «علم الكونيات الصغير» رائعة حيث يقول: «أتناول في هذا الكتاب كل الأمور.») وقد ضاعت كل هذه الكتب، ولا نعرف عن فكره إلا من خلال الاقتباسات والمراجع التي تركها المؤلفون القدماء، ومن خلال ملخصاتهم لأفكاره؛[٧] ولذلك فإن الفكر الصادر إنما هو نوع من الفكر شديد الإنسانية والعقلانية والمادية،[٨] إن ديموقريطوس يجمع ما بين الاهتمام الشديد بالطبيعة المستمد من وضوح متأثر بالفلسفة الطبيعية يخلو من رواسب أنظمة الأفكار الأسطورية، وبين الاهتمام الكبير بالإنسانية والاهتمام الأخلاقي العميق بالحياة، وعلى هذا النحو فقد سبق بنحو ألفي سنة أفضل سمات حركة تنوير القرن الثامن عشر، يتمثل النموذج الأخلاقي لديموقريطوس في صفاء الذهن الذي يتوصل إليه الإنسان من خلال الاعتدال والتوازن، عن طريق الثقة في المنطق وعدم السماح للنفس بالانقياد للعواطف.

كان أفلاطون وأرسطو على دراية بأفكار ديموقريطوس وحارباها، وفَعَلَا ذلك لصالح أفكار أخرى سيتسبب بعضها لاحقًا في خلق عقبات

في طريق تطور المعرفة، وأصر كلاهما على رفض تفسيرات ديموقريطوس المتأثرة بالفلسفة الطبيعية محاولين فهم العالم إما بطريقة غائية — اعتقادًا منهما أن كل شيء يحدث لسبب؛ وسوف يتضح أن طريقة التفكير تلك مضللة للغاية عند استخدامها في فهم أساليب الطبيعة — أو من خلال منظور الخير والشر خالطين الأمور البشرية بأمور ليست ذات علاقة بنا.

يتحدث أرسطو باستفاضة عن أفكار ديموقريطس وباحترام أيضًا، أما أفلاطون فلا يقتبس مطلقًا من ديموقريطوس، لكن الباحثين يشكون في وقتنا الحاضر أن سبب ذلك إنما يعود إلى اختيار متعمد وليس لعدم معرفته بأعمال ديموقريطوس، وتتضمن العديد من نصوص أفلاطون نقدًا ضمنيًّا لأفكار ديموقريطوس، كما هو الحال في نقده «للفيزيائيين» على سبيل المثال، ففي إحدى فقرات كتاب «فايدو» الذي يمثل أحد حوارات أفلاطون يقدم على لسان سقراط «توبيخًا» لكل «الفيزيائيين»، وكان لهذا التوبيخ أثر طويل الأمد، وفي هذا التوبيخ يشكو سقراط من أن «الفيزيائيين» عندما شرحوا أن الأرض كروية، ورفض ذلك لأنه أراد أن يعرف ما «النفع» الذي سيعود على الأرض من كونها كروية؛ وكيف يمكن أن تفيد الأرض هذه الكروية، وفي هذا الحوار الأفلاطوني يروي سقراط كيف أنه كان متحمسًا في البداية للفيزياء، وكيف خذلته في النهاية، فيقول:

> توقعت في البداية إخباري بأن الأرض مسطحة أو كروية، وأن يشرح لي أيضًا فيما بعد سبب ضرورة أن تكون بهذا الشكل، انطلاقًا من مبدأ الأفضل، فيثبت لي أن أفضل شيء للأرض هو أن تكون بهذا الشكل، وتوقعت في حالة قوله لي: إن الأرض تقع في مركز العالم، أن يوضح لي بعد ذلك كيف كان وجود الأرض في المركز مفيدًا لها.»[9]

انظروا إلى أي مدى كان أفلاطون العظيم مجانبًا للصواب في هذا الصدد!

هل هناك حدود للقابلية للانقسام؟

كتب ريتشارد فاينمان أعظم علماء الفيزياء في النصف الثاني من القرن العشرين في بداية دروسه التمهيدية عن الفيزياء:

> لو أن كارثة وقعت وأدت إلى دمار كل المعارف العلمية، ولم يتوارث الجيل التالي إلا جملة واحدة، فما هي الجملة التي قد تحتوي على أكبر قدر من المعلومات في أقل عدد من الكلمات؟ أعتقد أنها الافتراض الذري، أو الحقيقة الذرية أو أيًّا ما كان ما تطلقه عليه القائلة إن: «كل الأشياء مكونة من ذرات — جسيمات — صغيرة تدور في حركة أبدية، وتنجذب إلى بعضها البعض عندما تكون المسافة الفاصلة بينها صغيرة، لكنها تتنافر عندما تدفع إلى بعضها البعض»، في هذه الجملة ستجد قدرًا هائلًا من المعلومات عن العالم، إذا أعملت فحسب قدرًا صغيرًا من الخيال والتفكير.[١٠]

دون الحاجة إلى أي شيء من الفيزياء الحديثة، توصل ديموقريطوس بالفعل إلى فكرة أن كل الأشياء مكونة من جسيمات غير قابلة للانقسام، فكيف فعل ذلك؟

لقد بنى حججه على الملاحظة، فعلى سبيل المثال، تخيل محقًّا أن تآكل العجلة أو جفاف الملابس على حبل الغسيل قد يكون راجعًا إلى الهروب البطيء للجزيئات من الخشب أو من الماء، ورغم ذلك، فقد بنى بعض الحجج أيضًا على أسس فلسفية، فدعونا نركز على هذه الحجج أيضًا؛ لأن قوتها تمكنت من الوصول إلى الجاذبية الكمية.

لاحظ ديموقريطوس أن المادة لا يمكن أن تكون كلًّا مستمرًّا؛ لأنه سيكون ثمة تناقض في الفرضية في حال كونها كذلك، إننا نعلم بمنطق ديموقريطوس لأن أرسطو ذكره،[١١] يقول ديموقريطوس: تخيل أن المادة

قابلة للانقسام إلى ما لا نهاية، أي إنها يمكن أن تنقسم لعدد لا نهائي من المرات، تخيل أنك في هذه الحال ستقسم جزءًا من المادة إلى ما لا نهاية، فما الذي سيتبقى؟

هل يمكن أن تتبقى جسيمات صغيرة ذات بُعْد ممتد؟ كلا؛ لأنه في هذه الحالة لن ينقسم الجزء من المادة إلى ما لا نهاية، ومن ثم، فإن النقاط الخالية من الامتداد هي فقط التي ستبقى، لكن دعونا الآن نحاول تجميع أجزاء المادة بداية من هذه النقاط: فإذا جمعنا نقطتين خاليتين من الامتداد لن نتمكن من الحصول على شيء له امتداد، حتى وإن زدنا ثلاثة نقاط أو حتى أربعة، ومهما بلغ عدد النقاط المجمعة فلن نتمكن في الواقع من الحصول على أي امتداد؛ لأن هذه النقط لا امتداد لها، لهذا السبب لا يمكن اعتقاد أن المادة مكونة من نقاط لا امتداد لها؛ لأنه مهما بلغ عدد النقاط التي يمكننا تجميعها فإننا لن نحصل أبدًا على شيء له بعد ممتد، واستنتج ديموقريطوس أن الاحتمال الوحيد هو أن الجزء من المادة مكون من عدد «محدد» من القطع المحددة غير القابلة للانقسام، وكل منها لها حجم «محدد»، وهذه القطع هي الذرات.

هذا النوع الغامض من الجدل يعود إلى عصر ما قبل ديموقريطوس، ويعود هذا النوع الذكي من الجدل إلى منطقة تشيلنتو في جنوب إيطاليا، من بلدة تسمى حاليًا فيليا التي كانت في القرن الخامس قبل الميلاد مستعمرة إغريقية مزدهرة تسمى إيليا، عاش بارمنيديس هناك، وهو الفيلسوف الذي اتبع حرفيًا — وربما على نحو مبالغ — عقلانية ميليتوس والفكرة الناشئة هناك التي تقول: إن المنطق يمكن أن يكشف لنا كيف يمكن أن تكون الأمور خلاف ما تبدو، لقد استكشف بارمنيديس طريقًا للحقيقة عبر المنطق وحده، وقاده هذا الطريق إلى قول: إن كل المظاهر وهمية، ومن ثم أنشأ اتجاهًا فكريًا سيتجه تدريجيًا نحو الميتافيزيقا وينأى بنفسه عما سيُعْرَف لاحقًا «بالعلوم الطبيعية»، واستخدم تلميذه زينون الإيلي الحجج الذكية

في دعم هذه العقلانية المتعصبة التي تدحض مصداقية المظاهر جذريًّا، كان ضمن هذه الحجج سلسلة من المفارقات أصبحت معروفة باسم «مفارقات زينون»، وتسعى هذه المفارقات إلى بيان أن كل المظاهر زائفة، محتجة بسخف الفكرة الشائعة عن الحركة.[١٢]

وتقدم أشهر مفارقات زينون في صورة أمثولة قصيرة تتحدى فيها السلحفاة أخيل في سباق يبدأ وهي تسبقه فيه بعشرة أمتار، فهل سيتمكن أخيل من اللحاق بالسلحفاة؟ يقول زينون: إن المنطق الصارم يقضي بأن أخيل لن يتمكن أبدًا من ذلك، ففي الواقع قبل أن يلحق أخيل بالسلحفاة سيتوجب عليه أن يقطع مسافة العشرة أمتار الفاصلة بينهما، ولتحقيق ذلك سوف يستغرق قدرًا معينًا من الزمن، وفي هذه الأثناء ستكون السلحفاة قد تقدمت بضع سنتيمترات، ولقطع مسافة هذه السنتيمترات سوف يستغرق أخيل وقتًا أطول، لكن السلحفاة في هذه الأثناء ستكون قد أصبحت أكثر تقدمًا، وهكذا إلى ما لا نهاية، ومن ثم، يقول زينون: إن أخيل سيحتاج «عددًا لا نهائيًّا من المرات ليصل إلى السلحفاة، والعدد اللانهائي من المرات هو قدر لا نهائي من الزمن»، وبالتالي، وفقًا للمنطق الصارم فإن أخيل سيستغرق زمنًا لا نهائيًّا ليصل إلى السلحفاة؛ أو لن نراه أبدًا يفعل ذلك، إلا أننا نرى أخيل السريع يصل إلى السلحفاة ويتجاوز الكثير من السلاحف كما يشاء، فإن ما نراه غير منطقي ومن ثم فهو وهمي.

لنكن صرحاء مع أنفسنا، إن هذا الأمر لا يمكن أن يكون مقنعًا، فأين يكمن الخطأ؟ من الأجوبة المحتملة أن يكون زينون مخطئًا؛ لأنه ليس حقيقيًّا أنه بتجميع عدد لا نهائي من الأشياء يحصل المرء في النهاية على شيء لا نهائي، فإذا أخذت قطعة من الخيط وقطعتها إلى نصفين، ثم قطعتها إلى نصفين آخرين، ثم قطعتها نصفين مرة أخرى، وهكذا إلى ما لا نهاية؛ فسوف تحصل في النهاية على عدد لا نهائي من قطع الخيط الصغيرة، إلا أن مجموع هذه القطع سيكون محدودًا؛ لأن هذه القطع لا يمكن إلا أن تساوي

في النهاية الطول الأصلي للخيط، ونظرًا لأن العدد اللانهائي من الخيوط يمكن أن يكون خيطًا محدود الطول، فإن العدد اللانهائي من الفترات الزمنية متزايد القصر قد تكون زمنًا «محدودًا»، وسوف يستغرق البطل حتى إن قطع عددًا لا نهائيًا من المسافات متزايدة في الصغر زمنًا «محدودًا» لفعل ذلك، وسوف يلحق بالسلحفاة في النهاية.

يبدو أن المعضلة حُلَّت، فالحل يكمن في فكرة الاستمرارية، فمن الممكن أن توجد أوقات صغيرة على نحو اختياري، أي عدد لا نهائي يتكون منه وقت محدد، كان أرسطو أول مَنْ خمَّن هذه الاحتمالية التي طورها لاحقًا علماء الرياضيات القدماء والمحدثين.*

لكن هل هذا حقًّا هو الحل الصحيح في العالم «الحقيقي»؟ هل الخيوط القصيرة على نحو اختياري موجودة حقًّا؟ هل من الممكن حقًّا أن نقطع خيطًا لعدد «اختياري» من المرات؟ هل توجد أجزاء من الوقت صغيرة على نحو لا نهائي؟ هذه بالضبط هي المشكلة التي سيستلزم أن تواجهها الجاذبية الكمية.

وفقًا للتراث فقد قابل زينون ليوكيبوس وأصبح معلمه، ولهذا السبب كان ليوكيبوس على دراية بألغاز زينون، إلا أنه توصل لطريقة «مختلفة» لحلها، ويقول ليوكيبوس: إنه قد لا يوجد شيء صغير على نحو اختياري، إنه يوجد حد أدنى للقابلية للانقسام.

---

* من الناحية التقنية توجد مجاميع لا نهائية متقاربة، بالنسبة لمثال الخيط، فإن المجموع اللانهائي $\frac{1}{2}+\frac{1}{4}+\frac{1}{8}+\frac{1}{16}\cdots$ يتقارب إلى 1، لم تكن المجاميع المتقاربة اللانهائية مفهومة في عصر زينون، بل فهمها أرشميدس بعد ذلك بعدة قرون، واستخدمها في حساب المساحات، واستخدمها نيوتن بكثرة، لكن الوضوح المفاهيمي لهذه الكائنات الرياضية لم يتحقق إلا في القرن التاسع عشر على يد عالمي الرياضيات بولزانو وفايرشتراس، ورغم ذلك، فقد فهم أرسطو بالفعل أن هذه كانت طريقة ممكنة للإجابة على زينون؛ فالتفريق الأرسطي بين اللانهائية المطلقة واللانهائية المحتملة تحتوي بالفعل على الفكرة الأساسية المتمثلة في وجود فرق بين غياب حد للقابلية للانقسام، وبين احتمالية وجود شيء مقسم بالفعل لعدد لا نهائي من المرات.

الكون مكون من حبيبات وليس مستمرًا، وفي حالة وجود نقاط صغيرة على نحو لا نهائي فسيكون من المستحيل تكوين الامتداد، كما هو الحال في حجة ديموقريطوس المذكورة على لسان سقراط في السابق، ومن ثم فإن امتداد الخيط لا بد أن يكون مكونًا من عدد «محدد» من أشياء محددة ذات حجم «محدد»، «لا يمكن» قطع الخيط «مرات عديدة حسب الرغبة»؛ فالمادة ليست مستمرة بل مكونة من «ذرات» مستقلة ذات حجم محدد.

وسواء أكانت هذه الحجة المجردة صحيحة أم لا، فإن استنتاجها — كما نعرف اليوم — يحتوي على قدر كبير من الحقيقة، فالمادة بالفعل لها بنية ذرية، وإذا قسمت قطرة من الماء إلى نصفين، فسوف أحصل على قطرتي ماء، ويمكنني أن أقسم كل قطرة من هاتين القطرتين مرة أخرى وهكذا، إلا أنني لا أستطيع الاستمرار في التقسيم إلى ما لا نهاية، فعند نقطة معينة سيكون كل ما لديَّ جزيء واحد وسينتهي الأمر، فلا توجد قطرة ماء أصغر من جزيء ماء واحد.

كيف عرفنا ذلك في الوقت الحاضر؟ لقد تراكمت الأدلة عبر القرون، وكثير منها جاء من الكيمياء، فالمواد الكيميائية مكونة من تراكيب عدة عناصر ومكونة بنسب (وزنية) معبر عنها بأرقام صحيحة، وقد وضع علماء الكيمياء طريقة للتفكير في المواد حيث رأوا أنها مكونة من جزيئات مكونة من تراكيب ثابتة من الذرات، فعلى سبيل المثال، يتكون الماء — H_2O — من جزأين من الهيدروجين وجزء من الأكسجين.

إلا أن هذه لم تعدُ كونها مجرد دلالات، وحتى بداية القرن الماضي لم ينظر الكثير من العلماء والفلاسفة إلى الفرضية الذرية بعين التصديق، وكان من بين هؤلاء إرنست ماخ عالم الفيزياء والفيلسوف الشير الذي ستحظى أفكاره المتعلقة بالفضاء أهمية كبيرة عند أينشتاين، وفي نهاية محاضرة ألقاها لودفيج بولتزمان في أكاديمية العلوم الإمبراطورية في فيينا، أعلن ماخ رسميًا: «لا أصدق أن الذرات موجودة!» وكان هذا عام ١٨٩٧، علماء

كثيرون أمثال ماخ فهموا التسمية الكيميائية فقط على أنها طريقة تقليدية لتلخيص قوانين التفاعلات الكيميائية، وليس على أنها دليل على وجود جزئيات ماء فعليًّا مكونة من ذرتين من الهيدروجين وذرة من الأكسجين، وكان هؤلاء يقولون: إنه من غير الممكن رؤية الذرات، وكانوا يقولون أيضًا: إن الذرات لن تُرى أبدًا، وتساءلوا بعد ذلك قائلين: ما هو حجم الذرات؟ إن ديموقريطوس لم يتمكن مطلقًا من قياس حجم الذرات ...

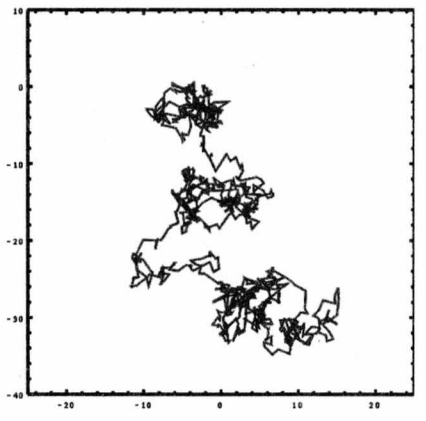
إلا أن شخصًا آخر تمكن من ذلك، لقد كان مقدرًا للدليل الحاسم لصحة «الفرضية الذرية» أن ينتظر حتى عام ١٩٠٥، ووجد هذا الدليل شاب متمرد في الخامسة والعشرين من عمره درس الفيزياء لكنه لم يتمكن من العمل كعالم، وكان يكسب عيشه من العمل كموظف في مكتب براءات الاختراع في برن، وسوف أتحدث كثيرًا عن هذا الشاب في هذا الكتاب، وعن المقالات الثلاثة التي أرسلها إلى صحيفة «أنالين دير فيزيك» أبرز المجلات الفيزيائية المرموقة في ذلك الوقت، احتوت أولى هذه المقالات على الدليل الحاسم على وجود الذرات، وحساب أبعادها، ومن ثم حُلَّت المشكلة التي واجهها كلٌّ من ليوكيبوس وديموقريطوس منذ ثلاثة وعشرين قرنًا.

ومن الواضح أن اسم هذا الشاب ذي الخمسة وعشرين ربيعًا هو ألبرت أينشتاين.

الشكل (١-٣): ألبرت أينشتاين.

فكيف فعل ذلك؟ الفكرة بسيطة على نحو مذهل، كان من الممكن أن يتوصل لها أي شخص منذ زمن ديموقريطوس لو كان يمتلك ذكاء أينشتاين وقدرًا كافيًا من المهارة بالرياضيات يمكناه من إجراء عملية حسابية لم تكن سهلة على الإطلاق، وتتمثل الفكرة فيما يلي: إذا لاحظنا بانتباه جسيمات صغيرة مثل ذرة تراب أو حبة

لقاح معلقة في الهواء الثابت أو في مائع، فسوف نراها ترتعش وترقص، وبدافع هذه الرعشة تتحرك تلك الجسيمات، وتسير في مسار متعرج على نحو عشوائي، ومن ثم تنحرف ببطء، وتبتعد تدريجيًا عن نقطة البداية، ويطلق على حركة هذه الجسيمات في المائع «الحركة البراونية» نسبةً إلى روبرت براون عالم الأحياء الذي وصفها بالتفصيل في القرن التاسع عشر، ويوضح الشكل (١-٤) المسار التقليدي للجسيم الراقص بهذه الطريقة، يبدو الأمر كما لو كان الجسيم يتلقى ضربات عشوائية من كلا الجانبين، في الواقع الأمر لا يبدو «كما لو كان» الجسيم يتلقى ضربات بل إنه يتلقى الضربات فعليًا، ويرتعش الجسيم لأن الجزيئات الفردية للهواء تضربه عند اصطدامها بالجسيم من اليمين تارة ومن اليسار تارة أخرى.



الشكل (١-٤): الحركة البراونية التقليدية.

أما النقطة الصعبة فتمثلت في التالي، يوجد عدد هائل من الجزئيات في الهواء، وفي المتوسط، فإن عدد الجزيئات التي تضرب الحبيبة من اليسار يساوي عدد الجزيئات التي تضربها من اليمين، فلو كان جزيئات الهواء صغيرة على نحو لا نهائي وعديدة على نحو لا نهائي فإن تأثير الاصطدام من اليمين واليسار سيتوازن؛ ومن ثم يلغى في كل لحظة، ولن تتحرك الحبيبة، إلا أن حجم الجزئيات المحدد — أي وجود الجزيئات بعدد «محدد» وليس بعدد لا نهائي — يتسبب في حدوث «اهتزازات» (فتلك هي الكلمة المناسبة)، أي إن الاصطدامات لا تتساوى «بالضبط» بل تتساوى «في المتوسط»،

تخيل للحظة لو أن الجزيئات كانت قليلة العدد للغاية وكبيرة الحجم، في هذه الحالة من الواضح أن الحبيبة سوف تتلقى ضربة بين الحين والآخر فحسب، تارة على اليمن، وتارة على اليسار... وبين كل اصطدام وآخر سوف تتحرك هنا وهناك لمسافة كبيرة مثل كرة قدم يقذفها صبية يجرون في الملعب، على جانب آخر، فكلما كانت الجزيئات أصغر أصبح الفاصل الزمني بين الاصطدامات أقصر، وأصبحت الضربات القادمة من الاتجاهات المختلفة أفضل في موازنة وإلغاء بعضها البعض، علاوة على ذلك، فإن حركة الحبيبة ستصبح أقل.

في الواقع من الممكن أن نحدد أبعاد الجزيئات بإجراء بعض العمليات الحسابية مستخدمين معدل حركة الحبيبة الذي يمكن أن نلاحظه، وهذا ما فعله أينشتاين عندما كان في الخامسة والعشرين من عمره كما ذكرت في السابق، فمن خلال ملاحظة الحبيبات التي تنحرف في الموائع من خلال قياس مدى «انحراف» هذه الحبيبات — أي ابتعادها عن موقع ما — حسب أينشتاين أبعاد ذرات ديموقريطوس التي تمثل الحبيبات الأولية التي تتكون منها المادة، لقد قدَّم بعد ٢٣٠٠ سنة الدليل على دقة وجهة نظر ديموقريطوس التي تقول: إن المادة حُبَيْبِيَّة.

طبيعة الأشياء

«لن تموت أعمال لوكريتيوس الجليلة إلا في يوم انتهاء العالم نفسه.»

أوفيد ١٣

في الغالب أعتقد أن خسارة أعمال ديموقريطوس بكاملها* هي أكبر

* إليكم قائمة بكل أعمال ديموقريطوس بعناوينها التي ذكرها ديوجانس اللايرتي: «علم الكونيات الكبير»، «علم الكونيات الصغير»، «علم أوصاف الكون»، «عن الكواكب»، «عن الطبيعة»، «عن الطبيعة البشرية»، «عن الذكاء»، «عن الحواس»، =

مأساة فكرية حدثت في أعقاب انهيار الحضارة الكلاسيكية القديمة، إذا نظرت إلى قائمة أعماله المذكورة في الحاشية السفلية ستجد أنه من الصعب ألا تغتم عندما تتخيل ما فقدناه من تأملات علمية هائلة تعود للعصور القديمة.

لقد ترك لنا كل أعمال أرسطو التي من خلالها أعاد الفكر الغربي تشكيل نفسه، ولم يترك لنا أي من أعمال ديموقريطوس، ربما لو بقيت كل أعمال ديموقريطوس وفُقِدَت كل أعمال أرسطو، لأصبح التاريخ الفكري لحضارتنا أفضل ...

إلا أن القرون التي سيطر عليها التوحيد لم تسمح ببقاء الفلسفة الطبيعية التي اعتنقها ديموقريطوس، إن إغلاق كل المدارس القديمة مثل مدرسة أثينا ومدرسة الإسكندرية وتدمير كل الكتب غير المتفقة مع الأفكار المسيحية كان منتشرًا وممنهجًا في زمن القمع الوحشي المناهض للوثنية الذي أعقب

= «عن الروح»، «عن النكهات»، «عن الحركات المتنوعة للذرات»، «عن تغيرات الأشكال»، «أسباب الظواهر الفلكية»، «أسباب الظواهر الجوية»، «عن النار والأشياء المشتعلة»، «أسباب الظواهر الصوتية»، «ما يتعلق بالمغناطيس»، «أسباب البذور والنباتات والفواكه»، «عن الحيوانات»، «وصف للسماء»، «الجغرافيا»، «وصف للقطب»، «عن الهندسة»، «الواقع الهندسي»، «عن مماسات الدائرة والكرة»، «الأرقام»، «عن الخطوط والمجسمات غير النسبية»، «الإسقاطات»، «الفلك»، «الجدول الفلكي»، «عن أشعة الضوء»، «عن الصور المنعكسة»، «عن الإيقاع والتناغم»، «عن الشعر»، «عن جمال الأغنية»، «عن تناغم وتنافر الأصوات»، «عن الشاعر هوميروس»، أو «عن الأسلوب الملحمي الصحيح»، «علم الطب»، «عن الزراعة»، «عن الكلمات»، «عن الأسماء»، «عن القيم» أو «عن الفضيلة»، «عن الطبع المميز للحكيم»، «عن الرسم»، «أطروحة عن التكتيكات»، «الطواف البحري في المحيط»، «عن التاريخ»، «فكر الإمبراطورية الكلدانية»، «فكر الفريجيون»، «عن كتابات بابل المقدسة»، «عن كتابات ميروي المقدسة»، «عن أنواع الحمى والسعال الناتجة عن المرض»، «عن المعضلة»، «أسئلة قانونية»، «فيثاغورس»، «عن المنطق» أو «معيار الفكر»، «تأكيدات»، «نقاط الأخلاق»، «عن الرفاهية»، وكل هذه الأعمال مفقودة ...

مراسيم الإمبراطور ثيودوسيوس الأول التي أَعلنت في الفترة ما بين ٣٩٠ إلى ٣٩١ أن المسيحية ستكون الديانة الوحيدة والإجبارية في الإمبراطورية، واستطاعت المسيحية المنتصرة التسامح مع أفلاطون وأرسطو الوثنيين اللذين يؤمنان بخلود الروح ووجود محرك أول للكون، لكنها لم تستطع التسامح مع ديموقريطوس.

إلا أن كتابًا واحدًا نجى من هذه الكارثة ووصل لنا بالكامل، ومن خلال هذا الكتاب عرفنا القليل عن المدرسة الذرية القديمة، والأهم من ذلك أننا عرفنا روح ذلك العلم، وهذا الكتاب هو القصيدة الرائعة «في طبيعة الأشياء» أو «عن طبيعة الكون» التي كتبها الشاعر اللاتيني لوكريتيوس.

يعتنق لوكريتيوس فلسفة إبيقور وهو تلميذ أحد تلامذة ديموقريطوس، ويولي إبيقور اهتمامًا بالمسائل الأخلاقية أكثر من اهتمامه بالجانب العلمي ولا يتمتع بعمق ديموقريطوس، وأحيانًا يترجم أفكار ديموقريطوس عن الفلسفة الذرية بطريقة سطحية بعض الشيء، إلا أن رؤيته للعالم الطبيعي تمثل في جوهرها نظرة فيلسوف أبديرة العظيم، ينقل لوكريتيوس في شعره فكر إبيقور وفلسفة ديموقريطوس الذرية، وبهذه الطريقة نجى جزء من هذه الفلسفة العميقة من الكارثة الفكرية التي لازمت العصور المظلمة، تغنى لوكريتيوس بالذرات والبحر والسماء والطبيعة، وعبَّر في شعره النير عن المسائل الفلسفية والأفكار العلمية والحجج الدقيقة.

> ... سأشرح القوى التي من خلالها توجه الطبيعة مسارات الشمس ورحلات القمر؛ كي لا نفترض أنهما يجريان في سباقاتهما السنوية بين السماء والأرض بإرادتهما الحرة ... أو أنهما يدوران في تقدم وفقًا لخطة إلهية ...[١٤]

يكمن جمال القصيدة في الإحساس بالروعة الذي يغمر الرؤية الذرية الواسعة - إحساس الوحدة العميقة للأشياء النابع من معرفة أننا كلنا مصنوعون من الجوهر نفسه كما هو الحال مع النجوم والبحر:

...كلنا نشأنا من بذرة سماوية، كلنا على حد سواء لدينا الأب نفسه الذي تتلقى منه الأرض الأم المغذية قطرات الرطوبة المنهمرة، وبعد تخصيبها بهذه الطريقة تلد المحاصيل الباسمة والأشجار القوية والبشر وكل أنواع الوحوش، إنها من تمنح الطعام الذي تتغذى عليه أجسامهم، ويعيشون حيواتهم المرحة ويجددون سباقهم ...[١٥]

يوجد هدوء واضح وسكينة في هذه القصيدة نابع من إدراك أنه لا توجد آلهة متقلبة تتطلب منا أمورًا صعبة وتعاقبنا، يشع من القصيدة بهجة حيوية ومرحة تبدأ بالأبيات الافتتاحية الرائعة المهداة إلى فينوس الرمز الساطع لقوة الطبيعة المبدعة:

أمامك تدبر الرياح، وبالقرب منك تنقشع السحب من السماء، وتضحك لك مستويات المحيط، وتهدأ السماء وتتوهج ببريق منتشر.[١٦]

يوجد قبول عميق للحياة التي نعد جزءًا لا يتجزأ منها:

ألا ترى أن الطبيعة لا تصيح إلا لأمرين فقط هما جسد خالٍ من الألم، وعقل تحرر من القلق والخوف ليستمتع بالأحاسيس الممتعة؟[١٧]

ويوجد في القصيدة قبول مطمئن لحتمية الموت، فالموت يلغي كل الشرور ولا يوجد ما نخشاه من الموت، ويرى لوكريتيوس أن الدين جهل، وأن المنطق هو المصباح الذي يجلب النور.

في يناير من عام ١٤١٧ أعاد عالم الإنسانيات بوجيو براشيوليني اكتشاف كتاب لوكريتيوس الذي كان منسيًّا لقرون، في مكتبة أحد الأديرة الألمانية، كان بوجيو سكرتيرًا لكثير من الباباوات، وكان مولعًا بجمع الكتب القديمة في أعقاب إعادة الاكتشافات الشهيرة التي قام بها فرانشيسكو بترارك، أسفر إعادة اكتشافه لكتاب من تأليف كينتيليان إلى تعديل مسار

دراسة القانون في كل كليات أوروبا؛ وأدى اكتشافه لأطروحة فيتروفيو عن العمارة إلى تغير طريقة تصميم وإنشاء المباني الجميلة، إلا أن أبرز انتصاراته كان إعادة اكتشاف لوكريتيوس، لقد فقدت المخطوطة الأصلية التي كتبها بوجيو، لكن النسخة التي كتبها صديقه نيكولو نيكولي (المعروفة حاليًا باسم المخطوطة اللورنسية ٣٥,٣٠) ما زالت محفوظة بالكامل في المكتبة اللورنسية في فلورنسا.

ومن المؤكد أن الأرض كانت ممهَّدة بالفعل لأمر جديد عندما أعاد بوجيو للإنسانية كتاب لوكريتيوس، وبالفعل منذ جيل دانتي كان من الممكن سماع لهجات جديدة على نحو مميز:

لقد أصابت عينيك فؤادي
لتوقظ فكري من السبات
انظري الآن فأنا بائس وفي شتات
من حب يمزق حياتي.[١٨]

إلا أن إعادة اكتشاف كتاب «في طبيعة الأشياء» كان لها أثر كبير على النهضة الإيطالية والأوروبية،[١٩] وتردد صداها على نحو مباشر أو غير مباشر في صفحات مؤلفين يتراوحون ما بين جاليليو[٢٠] إلى كيبلر[٢١]، ومن بيكون إلى ميكيافيللي، وفي أعمال شكسبير الذي جاء بعد قرن من بوجيو، تظهر الذرات في أعماله ظهورًا مبهجًا:

إذًا يا ماركيشيو فأنا أرى أن الملكة ماب كانت معك:
فهي قابلة الجنيات التي تأتي
في شكل لا يزيد عن حجم حجر العقيق
لتقف على سبابة أحد الحكام
أو مرسومة بفريق صغير من الذرات
فتقف على أنوف الرجال وهم نيام ...[٢٢]

يحتوي كتاب «مقالات مونتين» على ما لا يقل عن مائة اقتباس من لوكريتيوس، بَيْدَ أن التأثير المباشر للوكريتيوس امتد إلى نيوتن ودالتون وسبينوزا وداروين وصولًا إلى أينشتاين، إن فكرة أينشتاين القائلة: إن وجود الذرات تكشفه الحركة البراونية للجسيمات الدقيقة المغمورة في مائع يمكن أن تعود إلى لوكريتيوس، إليكم فقرة يقدم فيها لوكريتيوس «دليلًا حيًّا» على فكرة الذرات:

هذه العملية موضحة بصورة منها تحدث باستمرار أمام أعيننا، راقب ما يحدث عندما تدخل أشعة الشمس أحد المباني وتلقي الضوء على الأماكن الظليلة بها، سترى عددًا هائلًا من الجسيمات الدقيقة مختلطة بطرق مختلفة في المساحة الفارغة داخل ضوء الشعاع، كما لو كانت تتسابق في صراع مستمر، مندفعة إلى المعركة صفًّا تلو الآخر دون لحظة توقف في سلسلة سريعة من الاتحاد والانفصال، من هنا يمكن أن تتصور كيف تُلقى الذرات دائمًا في هذا الخواء اللامحدود، وإلى حد ما يمكن أن يقدم شيء صغير مثالًا وصورة غير مثالية لأمور عظيمة، علاوة على ذلك، يوجد سبب آخر لضرورة التفكير في هذه الجسيمات التي نراها تتراقص في شعاع الشمس؛ فرقصها عبارة عن إشارة فعلية على حركات المادة الكامنة الخافية عن نظرنا، وهناك سترى كثيرًا من الجسيمات تحت تأثير الضربات الخفية تغير مسارها وتدفع عائدة مرة أخرى إلى مساراتها في كل الاتجاهات، يجب أن تدرك أن اضطراب هذه الجسيمات راجع إلى الذرات، فهذا الاضطراب يبدأ مع الذرات التي تتحرك من تلقاء نفسها، وبعد ذلك فإن هذه الجسيمات الصغيرة المركبة التي ما زالت متأثرة بزخم الذرات تبدأ في الحركة بتأثير من الضربات الخفية وتصطدم بدورها بالجسيمات الأكبر نسبيًّا، ومن ثم فإن الحركة

تتصاعد من الذرات وتصعد تدريجيًّا إلى مستوى حواسنا بحيث تتحرك هذه الجسيمات لنراها في أشعة الشمس وهي تتحرك بفعل الضربات التي تظل خفية.[٢٣]

أحيا أينشتاين هذا «الدليل الحي» الذي قدَّمه لوكريتيوس والذي كان ديموقريطوس أول مَنْ صاغه على الأرجح، وجعله مثبتًا بأنه ترجمه إلى مصطلحات رياضية، ومن ثم تمكَّن من حساب حجم الذرات.

حاولت الكنيسة الكاثوليكية إيقاف لوكريتيوس، حيث قرر المجمع الكنسي «السينودس» المنعقد في فلورنسا في ديسمبر ١٥١٦ حظر قراءة أعمال لوكريتيوس في الجامعات، وفي عام ١٥٥١ حظر مجمع ترينت الكنسي أعماله، إلا أن الأوان قد فات، حيث عاد إلى الظهور مرة أخرى في أوروبا التي أعادت فتح عينيها رؤية كاملة للعالم كانت قد محتها الأصولية المسيحية في العصور الوسطى، لم تكن عقلانية وإلحاد ومادية لوكريتيوس هي فقط ما يُطْرَح في أوروبا؛ ولم يكن مجرد تأمل مستنير وهادئ في جمال العالم، لقد كان الأمر أكبر بكثير، حيث تمثل في بنية تفكير في الواقع محددة ومعقدة، لقد كان أسلوب تفكير جديد مختلفًا جذريًّا عن العقلية الذهنية التي سادت العصور الوسطى لقرون.[٢٤]

إن تصور الكون الذي قدمه دانتي على نحو رائع في العصور الوسطى إنما فسره على أساس التنظيم الهرمي للكون على نحو عكس التنظيم الهرمي للمجتمع الأوروبي، حيث تمثل في بنية كونية كروية مركزها الأرض، وفاصل بين الأرض والسماء لا يمكن تقليله، وتفسيرات غائية ومجازية للظواهر الطبيعية، واشتمل أيضًا على الخوف من الإله والخوف من الموت، وقلة الاهتمام بالطبيعة، وفكرة أن الأشكال السابقة للأشياء تحدد بنية العالم، وفكرة أن الماضي وحده سواء في الوحي أو في التقليد هو مصدر المعرفة ...

أما في عالم ديموقريطوس الذي عبر عنه لوكريتيوس فلا يوجد أي

من هذه الأمور، فلا يوجد خوف من الآلهة، ولا يوجد غاية أو غرض في العالم، ولا توجد هرمية كونية، ولا يوجد فارق بين الأرض والسماء، بل يوجد حب عميق للطبيعة، وانغماس هادئ فيها، وإدراك أننا جزء أصيل منها، وأن الرجال والنساء والحيوانات والنباتات والسحب ما هي إلا خيوط عضوية في هذا الكل المدهش دون وجود هرميات، وتوحي كلمات ديموقريطوس الرائعة بإحساس بالشمولية العميقة حيث يقول: «يرى الإنسان الحكيم أن الأرض كلها مفتوحة؛ لأن الكون بأَسْرِه هو البلد الحقيقي للروح الفاضلة.»[٢٥]

بالإضافة إلى ذلك يوجد طموح في القدرة على التفكير في العالم بطرق بسيطة، والقدرة على البحث في أسرار الطبيعة وفهمهما؛ ومعرفة أكثر مما عرفه آباؤنا، علاوة على ذلك، توجد أدوات مفاهيمية رائعة سيعتمد عليها جاليليو وكيبلر ونيوتن، وهذه الأدوات تتمثل في فكرة الحركة الخطية الحرة في الفضاء، وفكرة الأجسام الأساسية وتفاعلاتها التي يتكون منها الكون، وفكرة الفضاء كوعاء للعالم.

وتوجد أيضًا الفكرة البسيطة القائلة: إن قابلية الأشياء للانقسام محدودة؛ وإن العالم مكون من حبيبات، وهذه الفكرة توقف فكرة اللانهائية، وهذه الفكرة هي أساس الفرضية الذرية، لكنها ستعود أيضًا بقوة مضاعفة مع ميكانيكا الكم، وتثبت قوتها في الوقت الحاضرة مرة أخرى باعتبارها أساس الجاذبية الكمية.

أما أول شخص سيجعل أجزاء الفسيفساء التي نشأت من المدرسة الطبيعية في عصر النهضة متماسكة، ويعيد رؤية ديموقريطوس ويدعمها بشدة ويجعلها مركز الفكر الحديث فسيكون رجلًا إنجليزيًّا يُعَد أعظم عالم في التاريخ، وهو أول أبطال الفصل التالي.

الفصل الثاني
الكلاسيكيات

إسحق والقمر الصغير

إذا بَدَا في الفصل السابق أنني أقول: إن أفلاطون وأرسطو قد أضرَّا بتطور العلوم، فإنني أود أن أصحح هذا الانطباع؛ إن دراسات أرسطو عن الطبيعة — عن النبات وعلم الحيوان على سبيل المثال — هي أعمال علمية رائعة قائمة على ملاحظات دقيقة للعالم الطبيعي، إن ما يتمتع به الفيلسوف العظيم من وضوح مفاهيمي وانتباه إلى تنوع الطبيعة وذكاء مؤثر وانفتاح عقلي جعله مرجعية لقرون بعده، علاوة على ذلك، فإن أرسطو هو مَنْ وضع أول فيزياء منهجية نعرفها، وهي ليست فيزياء سيئة على الإطلاق.

قدم أرسطو هذه الفيزياء في كتاب اسمه بالتحديد «الفيزياء»، ولم يأخذ الكتاب اسمه من هذه المادة العلمية، بل المادة العلمية هي من اتخذت اسمها من كتاب أرسطو، يرى أرسطو أن الفيزياء تسير على النحو التالي ذكره؛ أولًا: من الضروري التفريق بين السماء والأرض، ففي السماء يتكون كل شيء من مادة بلورية تتحرك في حركة دائرية وتدور للأبد حول الأرض في دوائر كبيرة متحدة المركز، والأرض الكروية هي مركز كل شيء، أما على الأرض فمن الضروري التمييز بين الحركة الإجبارية والحركة الطبيعية، تحدث الحركة الإجبارية نتيجة لقوة دافعة، وتنتهي عندما تنتهي القوة الدافعة، أما الحركة الطبيعية فهي رأسية — متجهة لأعلى أو متجهة لأسفل —

وتعتمد على كلٍّ من المادة والموقع، فكل مادة لها «مكان طبيعي»، أي ارتفاع مناسب تعود إليه دائمًا وهو كالتالي: الأرض في الأسفل، والماء فوقها قليلًا، والهواء أعلاها قليلًا، والنار أكثر علوًّا، عندما تلتقط حجرًا وتسقطه، فإن الحجر يتحرك لأسفل لأنه يريد العودة إلى مستواه الطبيعي، أما فقاعات الهواء في الماء، والنار في الهواء، وبالونات الأطفال فتتحرك لأعلى ساعية إلى مكانها الطبيعي.

إياك أن تسخر من هذه النظرية أو ترفضها؛ لأنها فيزياء سليمة جدًّا، إنها وصف جيد وصحيح لحركة الأجسام المغمورة في مائع والخاضعة للجاذبية والاحتكاك، والمقصود بها الأشياء التي نصادفها في حياتنا اليومية، إنها ليست فيزياء خاطئة كما يقال غالبًا،* إنما هي تقريب، أما فيزياء نيوتن أيضًا فهي تقريب للنسبية العامة، وعلى الأرجح فإن كل ما نعرفه اليوم هو أيضًا تقريب لشيء آخر لم نعلمه بعدُ. إن الفيزياء الأرسطية ليست دقيقة، فهي ليست كمية (فإننا لا نستطيع إجراء الحسابات باستخدامها)، لكنها متماسكة وعقلانية وتمكننا من القيام بتوقعات كيفية صحيحة، فليس من فراغ أنها ظلت لقرون أفضل نموذج متاح لفهم الحركة.[1]

وعلى الأرجح كان أفلاطون هو الأكثر أهمية للتطور المستقبلي للعلوم.

فهو مَنْ فهم قيمة حدث فيثاغورس والفيثاغورية، وأن مفتاح المضي قدمًا والتفوق على ميليتوس هو الرياضيات.

وُلِدَ فيثاغورس في ساموس، وهي جزيرة صغيرة ليست ببعيدة عن ميليتوس، يروي يامبليخوس وفرفوريوس الصوري — وهما أول من كتب سيرة فيثاغورس الذاتية — أن فيثاغورس وهو شاب كان تلميذًا

---

* تعود السمعة السيئة للفيزياء الأرسطية إلى انتقادات جاليليو، لقد رغب جاليليو في المضي قدمًا، ومن ثم كان في حاجة إلى انتقاد أرسطو، فهاجم أرسطو بضراوة وازدراء وسخرية، ورغم ذلك، فقدد تناول فيزياء أرسطو بجدية بالغة.

لأناكسيماندر العجوز، لقد نشأ كل شيء في ميليتوس، وكان فيثاغورس كثير الأسفار، فسافر على الأرجح في مصر وارتحل بعيدًا إلى بابل قبل أن يستقر في النهاية في جنوب إيطاليا في مدينة كروتوني، حيث أسس طائفة دينية سياسية عملية لعبت دورًا مهمًّا في سياسية تلك المدينة الصغيرة لكنها تركت إرثًا هائلًا للعالم أجمع تمثَّل في الفائدة النظرية للرياضيات؛ ويقال: إن فيثاغورس أكد على أن العدد «يحكم الأشكال والأفكار.»[٢]

خلَّص أفلاطون الفيثاغورية من عبئها الصوفي المعقد وغير المفيد، واستوعب ولخص رسالتها المهمة القائلة: إن الرياضيات هي أفضل لغة يمكن استخدامها لفهم ووصف العالم، وكان مدى انتشار هذه الفكرة واسعًا، فهو أحد أسباب نجاح العلوم الغربية، ووفقًا للتراث، فقد حفر أفلاطون على باب مدرسته العبارة التالية: «غير مسموح بالدخول لكل من يجهل الهندسة.»

من منطلق هذا الاعتقاد طرح أفلاطون سؤالًا مهمًّا ستخرج منه العلوم الحديثة بعد طريق طويل، فمن بين كل تلامذته الذين درسوا الرياضيات تساءل أفلاطون عن إمكانية إيجاد القوانين الرياضية التي تتبعها الأجرام السماوية المرئية في السماء، يمكن بسهولة مشاهدة الزهرة والمريخ والمشتري في السماء ليلًا، ويبدو أنهم يتحركون قليلًا بعشوائية ذهابًا وإيابًا بين النجوم الأخرى، فهل من الممكن العثور على عملية حسابية قادرة على وصف هذه الحركات وتوقعها؟

بدأت الممارسة على يد إيودوكسوس في مدرسة أفلاطون، واستمرت على مدار القرون التالية على يد فلكيين أمثال أرسطرخس الساموسى وهيبارخوس، فوصل علم الفلك القديم إلى مستوى علمي متقدم للغاية، وعلمنا عن انتصارات هذا العلم بفضل كتاب واحد كُتِبَ له البقاء وهو كتاب «المجسطي» لبطليموس، كان بطليموس فلكيًّا عاش في الإسكندرية في القرن الأول الميلادي تحت حكم الإمبراطورية الرومانية، عندما كان العلم

متدهورًا بالفعل وعلى وشك الاختفاء كليًّا، متأثرًا بانهيار العالم الهلنستي ومقموعًا بسبب تحويل الإمبراطورية إلى المسيحية.

يُعَد كتاب بطليموس كتابًا علميًّا بارزًا، فهو دقيق ومحدد ومعقد يقدم نظامًا فلكيًّا رياضيًّا يمكِّن من توقع الحركات شبه العشوائية للكواكب في السماء بدقة شبه كاملة واضعًا في الاعتبار عيوب العين البشرية، وهذا الكتاب دليل على صحة حدس فيثاغورس، فالرياضيات تسمح بوصف العالم وتوقع المستقبل؛ فحركات الكواكب التي تبدو هائمة وغير منظمة يمكن توقعها بدقة باستخدام صيغ رياضية يقدمها بطليموس بطريقة منهجية ومتقنة يلخص فيها نتائج أعمال فلكيين إغريقين على مدار قرون، وحتى وقتنا المعاصر، من الممكن بقليل من الدراسة فتح كتاب بطليموس ومعرفة أساليبه و«حساب» الموقع الذي سيتخذه المريخ في السماء «مستقبلًا» على سبيل المثال، واليوم يكون قد مر ألفا عام على كتابة هذا الكتاب، وإدراك أن هذه الحسابات السحرية ممكنة حقًّا هو أساس العلم الحديث ويدين بالكثير لكل من فيثاغورس وأفلاطون.

بعد انهيار العلم القديم لم يستطع أحد في كل أرجاء حوض البحر المتوسط من فهم كتاب بطليموس أو غيره من الأعمال العلمية القليلة التي نجت من هذه الكارثة، مثل كتاب «الأصول» لإقليدس، أما في الهند التي وصل إليها العلم الإغريقي بفضل التبادلات التجارية والثقافية الهائلة، فقد خضعت هذه الكتب للدراسة ومن ثم كانت مفهومة.

ومن الهند عادت هذه المعرفة إلى الغرب بفضل العلماء الفرس والعرب النجباء الذين تمكنوا من فهمها وحفظها، إلا أن علم الفلك لم يخْطُ أي خطوة مهمة للأمام على مدار ما يزيد عن ألف سنة.

وتقريبًا في الوقت نفسه الذي اكتشف فيه بوجيو براشيوليني مخطوطة لوكريتيوس، سحر جو الإنسانية الإيطالية المثير والحماس للنصوص القديمة شابًّا بولنديًّا كان قد أتى إلى إيطاليا للدراسة في بولونيا أولًا ثم في

بادوا، كان هذا الشاب يوقع اسمه باللاتينية على النحو التالي: نيكولاس كوبرنيكوس، درس كوبرنيكوس الشاب كتاب «المجسطي» لبطليموس ووقع في غرامه، وقرر أن يقضي حياته في ممارسة الفلك سائرًا على خطى بطليموس العظيم.

أصبح الوقت الآن مناسبًا بعد مرور ما يزيد عن ألف سنة بعد بطليموس، وتمكن كوبرنيكوس من أخذ خطوة التقدم التي عجز عنها أجيال من الفلكيين الهنود والعرب والفرس؛ فلم يتوقف عن التعلم فحسب والتطبيق وإضافة التحسينات البسيطة لنظام بطليموس، بل حسَّنه تمامًا، وكان لديه شجاعة تغييره في الصميم، فبدلًا من وصف أجرام سماوية تدور حول الأرض، كتب كوبرنيكوس نسخة مراجعة ومصححة من كتاب «المجسطي» لبطليموس، جعل فيه الشمس في المركز والأرض وغيرها من الكواكب تدور حولها.

وأمل كوبرنيكوس أن تسير الحسابات على نحو أفضل بهذه الطريقة، أما في الواقع، فهذه الحسابات لم تسر على نحو أفضل من حسابات بطليموس، بل في النهاية اتضح أنها أقل كفاءة، ورغم ذلك، فقد كانت الفكرة سليمة؛ ففي الجيل التالي أوضح يوهانس كيبلر أن النظام الكوبرنيكي من الممكن جعله يعمل على نحو أفضل من نظام بطليموس، فعكف كيبلر بجهد شديد على تحليل ملاحظات دقيقة جديدة، وأوضح أن بعض القوانين الرياضية الجديدة يمكن أن تصف بدقة حركات الكواكب التي تدور حول الشمس وبمستوى دقة يفوق أي مستوى توصل إليه في العصور القديمة، كان ذلك الوقت في عام ١٦٠٠، وكانت المرة الأولى التي تكتشف فيها البشرية طريقة فعل شيء على نحو أفضل مما كان يتم في الإسكندرية منذ أكثر من ألف سنة.

بينما كان كيبلر يحسب في الشمال البارد حركات الأجرام في السماء، بدأ العلم الجديد في الانطلاق في إيطاليا على يد جاليليو جاليلي، أرسل إلى

جاليليو، ذلك الشاب المتحمس الإيطالي، المنتقد المجادل، شديد الثقافة، فائق الذكاء، كثير الابتكار، اختراعًا جديدًا من هولندا — التلسكوب — وفعل جاليليو حركة غيرت تاريخ البشرية، لقد صوَّب التلسكوب نحو السماء.

ومثل شخصية روي في فيلم «بليد رانر»، رأى جاليليو أشياءً لن يصدقها الناس، فرأي حلقات حول زحل، وجبالًا على القمر، وأوجه كوكب الزهرة، وأقمارًا تدور حول المشتري ... وكل ظاهرة من هذه الظواهر تجعل أفكار كوبرنيكوس أكثر قابلية للتصديق، وبدأت الأجهزة العلمية تفتح عين البشرية قصيرة النظر على عالم أكثر اتساعًا وتنوعًا عما استطاعت رؤيته.

إلا أن فكرة جاليليو الكبرى تمثلت في إجراء الاستنتاج المنطقي من الثورة الكونية التي أحدثها كوبرنيكوس؛ فمن منطلق اقتناع جاليليو بأن الأرض كوكب مثل بقية الكواكب رأى أنه إذا كانت حركات الأجرام السماوية تتبع قوانين رياضية دقيقة، وإذا كانت الأرض مثل الكواكب الأخرى، ومن ثم جزءًا من السماء، فلا بد أنه يوجد أيضًا قوانين رياضية دقيقة تحكم حركات الأشياء على «الأرض».

وثقةً في عقلانية الطبيعة ورؤية فيثاغورس وأفلاطون القائلة: إن الطبيعة يمكن فهمها من خلال الرياضيات، قرر جاليليو دراسة «كيفية» تحرك الأشياء على الأرض عندما تكون حرة — أي عند سقوطها — ونظرًا لاقتناعه بضرورة وجود قانون رياضي وثيق الصلة، انطلق يبحث عنه من خلال التجربة والخطأ، فأجرى «تجربة» لأول مرة في التاريخ البشري، لقد بدأ العلم التجريبي مع جاليليو، وكانت تجربته بسيطة: لقد جعل الأشياء تسقط؛ أي إنه سمح لها باتباع حركتها الطبيعية وفقًا لأرسطو، وسعى إلى قياس سرعة سقوطها بدقة.

وكانت النتيجة بالغة الأهمية، حيث تمثلت في أن الأشياء لا تسقط دائمًا بسرعة ثابتة كما اعتقد الجميع، بل سرعتها هي التي تزداد تدريجيًا أثناء

الجزء الأول من السقوط، وفي هذه المرحلة، لا تكون سرعة السقوط هي الثابتة إنما «التسارع»، أي معدل ازدياد السرعة، وعلى نحو سحري اتضح أن هذا التسارع ثابت بالنسبة لكل الأشياء، أجرى جاليليو قياسًا أوليًّا تقريبيًّا لهذا التسارع ووجد أنه ثابت، وتبلغ قيمته تقريبيًا ٩,٨ مترًا في الثانية لكل ثانية، وهذا يعني أنه في كل ثانية يسقط فيها أحد الأشياء تزداد سرعته بمعدل ٩,٨ مترًا في الثانية، تذكر هذا الرقم.

إن قانون الأجسام الساقطة هو أول قانون رياضي يُكْتشف للأجسام الأرضية،* حتى هذه المرحلة لم تُكتشف إلا القوانين الرياضية الخاصة بحركات الكواكب، ومن ثم لم يعد الكمال الرياضي قاصرًا على السماء.

إلا أن النتيجة الكبرى ستأتي لاحقًا وسيكون إسحق نيوتن من سيتوصل إليها، درس نيوتن بالتفصيل النتائج التي توصل لها جاليليو وكيبلر، وبالجمع بينهما وجد الجوهرة المخفية، يمكننا تتبع تفكيره المتعلق «بالقمر الصغير» كما يرويه بنفسه في كتاب «الأصول الرياضية للفلسفة الطبيعية»، ويمثل هذا الكتاب أساس العلم الحديث.

يقول نيوتن: تخيل أن الأرض لها أقمار كثيرة مثل المشتري، وتخيل أنه بالإضافة إلى القمر الحقيقي يوجد أقمار أخرى لا سيما «قمر صغير» يدور على مسافة قليلة للغاية من الأرض فوق قمم الجبال، فكم ستكون سرعة دوران هذا القمر الصغير؟ أحد القوانين التي اكتشفها كيبلر تربط ما بين نصف قطر المدار والفترة المدارية، أي الزمن المستغرق لإكمال المدار،** ونصف قطر مدار القمر الحقيقي معروف لنا (فقد قاسه هيبارخوس في $(x = \frac{1}{2}\, a\, t^2)$ *.

** مربع الفترة المدارية تتناسب مع مكعب نصف قطر المدار، ثبت صحة هذا القانون ليس فقط بالنسبة للكواكب التي تدور حول الشمس (كيبلر)، بل أيضًا بالنسبة لأقمار المشتري (هايجنز)، يفترض نيوتن بالاستنتاج أنه ينطبق أيضًا على القمر الافتراضي الصغير الذي يدور حول الأرض، يعتمد ثابت التناسب على الجسم الموجود حوله المدار؛ ولهذا السبب تسمح لنا بيانات المدار القمري بحساب الفترة المدارية للقمر الصغير.

العصور القديمة) والفترة المدارية (شهر واحد)، ونعلم نصف قطر مدار القمر الصغير (فقد قاس إراتوستينس نصف قطر الأرض في العصور القديمة)، وبتناسب بسيط يمكننا حساب فترة دوران القمر الصغير، والنتيجة هي ساعة ونصف، فالقمر الصغير سيكمل دورته حول الأرض كل ساعة ونصف الساعة.

الجسم الذي يدور لا يسير في مسار مستقيم بل يغير اتجاهه باستمرار، وتغيير الاتجاه يُطْلَق عليه «تسارع»، والقمر الصغير يتسارع نحو مركز الأرض، ومن السهل حساب هذا التسارع،* وأجرى نيوتن هذا الحساب البسيط وكانت النتيجة ٩,٨ مترًا في الثانية لكل ثانية! وهو التسارع نفسه الموجود في تجارب جاليليو للأجسام الساقطة على الأرض.

هل الأمر صدفة؟ يقول نيوتن: إنه لا يمكن أن يكون كذلك؛ لأنه إذا كانت «النتيجة» واحدة — تسارع لأسفل يساوي ٩,٨ مترًا في الثانية لكل ثانية — فلا بد أن يكون «السبب» واحدًا، ومن ثم فإن:

> القوة التي تجعل القمر الصغير يدور حول مداره لا بد أن تكون مماثلة للقوة التي تجعل الأشياء تسقط لأسفل على الأرض.

نطلق على القوة التي تتسبب في سقوط الأشياء «الجاذبية»، فهم نيوتن أن هذه هي الجاذبية نفسها التي تجعل القمر الصغير يدور حول الأرض، وبدون هذه الجاذبية سيفر في خط مستقيم، على الجانب الآخر، فإن القمر الحقيقي لا بد أنه يدور أيضًا حول الأرض بسبب الجاذبية! والأقمار التي تدور حول المشتري يجذبها المشتري، والكواكب التي تدور حول الشمس تجذبها الشمس، وبدون هذا الجذب سيتحرك كل جِرْم سماوي في خط مستقيم، ومن ثم فإن الكون عبارة عن فضاء شاسع تجذب فيه الأجرام بعضها البعض من خلال القوى؛ وهناك قوة عامة هي الجاذبية، فالأجسام تجذب بعضها البعض.

* $a = v^2/r$ حيث v هي السرعة وتمثل r نصف قطر المدار.

وتشكلت رؤية هائلة، ففجأة بعد مرور آلاف السنوات، لم يعد يوجد فرق بين السماء والأرض؛ ولم يعد يوجد «مستوى طبيعيًا» للأشياء كما افترض أرسطو؛ ولم يعد يوجد مركز للعالم؛ ولم تعد الأشياء الحرة تسعى إلى مكانها الطبيعي بل تتحرك في خط مستقيم للأبد.

بإجراء حسبة بسيطة باستخدام القمر الصغير تمكَّن نيوتن من أن يستنتج كيف تتغير قوة الجاذبية مع المسافة، وتمكن من تحديد قوتها،* من خلال ما نطلق عليه اليوم ثابت نيوتن الذي يشار إليه بالحرف «G» رمزًا «للجاذبية»، وعلى الأرض تتسبب هذه القوة في سقوط الأشياء؛ أما في السماء فهي تثبت الكواكب والأقمار في مداراتها، فهذه القوة واحدة.

إنها إطاحة بالبنية المفاهيمية للعالم الأرسطي التي تمثل رؤية العالم التي كانت سائدة على مدار العصور الوسطى، فكِّر في الكون من منظور دانتي على سبيل المثال، سترى أنه يشبه أرسطو تمامًا في تصور أن الأرض عبارة عن كرة في منتصف الكون يدور حولها الأجرام السماوية، لكن هذا لم يعد هو الرؤية السائدة، فلقد اتضح أن الكون عبارة عن فضاء شاسع لا نهائي، مرصع بالنجوم، دون حد ودون مركز، وداخل هذا الفضاء تسبح الأجسام المادية بحرية وعلى خط مستقيم ما لم تؤثر عليها قوة متولدة عن جسم آخر فتجعلها تنحرف، والإشارة إلى الفلسفة الذرية القديمة واضحة في كلام نيوتن حتى لو صاغ الكلام بمصطلحات تقليدية:

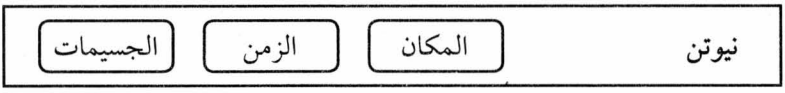
> يبدو مرجحًا بالنسبة لي أن الرب في البداية خلق المادة على صورة جسيمات قابلة للحركة جامدة وضخمة وصلبة وغير قابلة للاختراق، بهذه الأحجام والأشكال، وبهذه الصفات الأخرى، وبهذه النسب بالنسبة للفضاء ...[٣]

---

* $F = G\frac{M_1 M_2}{r^2}$

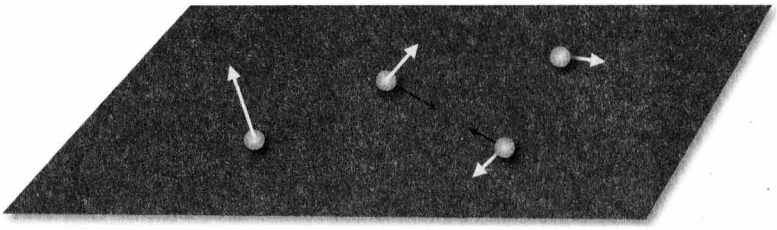
عالم ميكانيكا نيوتن بسيط ويلخصه الشكل (٢ -١) و(٢ -٢)، إنه عالم ديموقريطوس الذي وُلِدَ من جديد، إنه عالم مكون من فضاء شاسع متماثل مساوي لنفسه دائمًا، تسبح فيه الجسيمات للأبد وتؤثر على بعضها البعض ولا شيء آخر، ويعبر الشاعر ليوباردي عن هذا العالم فيقول:

... أدركت وأنا جالس هنا أحدق
أن الفضاء الموجود خلف ذلك السياج
والصمت الذي يفوق طاقة البشر
وبالغ السلام والصمت
كلها أمور أصنعها في فكري ... ٤



الشكل (٢ - ١): مم يتكون العالم؟

أما الآن فقد أصبحت الرؤية أقوى كثيرًا عما كانت عليه في عصر ديموقريطوس؛ لأنها لم تعد صورة ذهنية يتنظم العالم من خلالها، بل أصبحت الآن مدعومة بالرياضيات وبتراث فيثاغورس، وبالتقليد العظيم



الشكل (٢ - ٢): عالم نيوتن: جسيمات تتحرك في الفضاء مع مرور الوقت وتتجاذب بفعل القوى.

الذي تركه فلكيو الإسكندرية المتمثل في الفيزياء الرياضية، إن عالم نيوتن هو عالم ديموقريطوس بعد إكسابه الصيغة الرياضية.

يعترف نيوتن بلا تردد بأن العلم الحديث مَدِين لعلم العصور القديمة، فعلى سبيل المثال، في السطور الأولى من كتابه «نظام العالم» ينسب إلى العصور القديمة (على نحو صحيح) أصول الفكرة التي قامت على أساسها الثورة الكوبرنيكية، فيقول: «لقد رأى الفلاسفة القدماء أنه في الأجزاء العليا من العالم تظل النجوم ثابتة وبلا حركة، وأن الأرض تدور حول الشمس»، ورغم ذلك فإنه متحير بعض الشيء بخصوص نسبة الأمر لصناعه القدماء، فيقتبس — أحيانًا على نحو مناسب وأحيانًا على نحو خارج السياق — أقوال كل من فيلولاوس وأرسطرخس الساموسي، أناكسيماندر، أفلاطون، أناكساغوراس، ديموقريطوس والمثقف (!) «نوما بومبيليوس ملك الرومان».

ثبت أن قوة الإطار الفكري النيوتني الجديد تتجاوز كل التوقعات، فكل تكنولوجيا القرن التاسع عشر وتكنولوجيا عالمنا الحديث تعتمد كثيرًا على صيغ نيوتن، لقد مرت ثلاثة قرون، إلا أننا بفضل النظريات القائمة على معادلات نيوتن نبني اليوم الجسور والقطارات وناطحات السحاب والمحركات والأنظمة الهيدروليكية؛ ونعرف كيف نجعل الطائرات تطير، ونتوصل لتوقعات الطقس، ونتوقع وجود أحد الكواكب قبل رؤيته، ونرسل السفن الفضائية إلى المريخ ... فالعالم الحديث لم يكن ليولد لولا أن مررنا عبر قمر نيوتن الصغير.

إن التصور الجديد للعالم، وطريقة التفكير التي أثارت حماس تنوير فولتير وكانط، والطريقة الفعالة لتنبؤ المستقبل؛ كان وما زال يمثل التراث الهائل للثورة النيوتنية.

وهكذا بَدَا أن الوسيلة الأخيرة لفهم الواقع قد اكتُشِفَت؛ فالعالم لا يتكون إلا من فضاء شاسع لا حدود له تتحرك فيه الجسيمات وتتجاذب عن طريق القوى مع مرور الزمن، يمكننا أن نكتب معادلات دقيقة لوصف

تلك القوى، وتمتاز هذه المعادلات بالفعالية الهائلة، إلا أن الناس قالوا في القرن التاسع عشر أن نيوتن لم يكن فقط واحدًا من أكثر الرجال ذكاءً وبُعْد نظر بل كان أوفرهم حظًّا أيضًا؛ نظرًا لوجود نظام واحد فقط للقوانين الأساسية وحالفه الحظ في اكتشافه، لقد بدا كل شيء جليًّا.

لكن هل هذا كل ما في الأمر؟

مايكل: الحقول والضوء

عرف نيوتن أن معادلاته لا تصف «كل» القوى الموجودة في الطبيعة، فهناك قوى أخرى غير الجاذبية تؤثر على الأجسام، فالأشياء لا تتحرك فقط عندما تسقط، والمسألة الأولى التي تركها نيوتن بلا حل تمثلت في فهم القوى «الأخرى» التي تتحكم فيما يحدث حولنا، وكان لزامًا أن تنتظر هذه المسألة حتى القرن التاسع عشر، وأدت إلى مفاجأتين.

تمثلت المفاجأة الأولى في أن تقريبًا كل الظواهر التي نراها تحكمها قوة «واحدة» غير الجاذبية، وهي القوة التي نطلق عليها اليوم الكهرومغناطيسية، فهذه القوة هي ما يمسك المادة التي تكون الأجسام الصلبة، وتمسك الذرات في الجزيئات، وتمسك الإليكترونات في الذرات، فهي السبب في فعالية الكيمياء والمادة الحية، إنها المادة التي تشغل العصبونات في الدماغ وتتحكم في معالجتنا لمعلومات العالم الذي نراه، وتتحكم في طريقة تفكيرنا، وهذه هي القوة التي تتسبب دائمًا في الاحتكاك الذي يوقف الجسم المنزلق، ويخفف حدة هبوط المظلي، ويدير المحركات الكهربية ومحركات الاحتراق الداخلي،* أو هي القوة التي تسمح لنا بإشعال المصابيح والاستماع إلى الراديو.

---

* الطاقة الصادرة عن محركات الاحتراق الداخلي طاقة كيميائية، ومن ثم فهي في النهاية طاقة كهرومغناطيسية.

أما المفاجأة الثانية والأكبر والضرورية للقصة التي أرويها فتتمثل في أن فهم هذه القوة يتطلب تعديلًا مهمًّا لعالم نيوتن؛ وهذا التعديل هو ما خرجت من رحمه الفيزياء الحديثة، وهو أهم فكرة لا بد من التركيز عليها لفهم بقية الكتاب، ويتمثل في فكرة المجال.

تحقق فهم آلية عمل الكهرومغناطيسية على يد بريطاني آخر، بل على يد اثنين من البريطانيين يُعَدَّان أغرب ثنائي علمي وهما: مايكل فاراداي وجيمس كلارك ماكسويل.

كان مايكل فاراداي من فقراء لندن، ولم يَحْظَ بتعليم رسمي، عمل أولًا في محل لتجليد الكتب ثم عمل في أحد المعامل، وأظهر نبوغًا وكسب ثقة معلمه، وأصبح أنبه من أجرى تجارب فيزيائية في القرن التاسع عشر وأعظم حالم في ذلك القرن.

الشكل (٢ - ٣): مايكل فاراداي وجيمس كلارك ماكسويل.

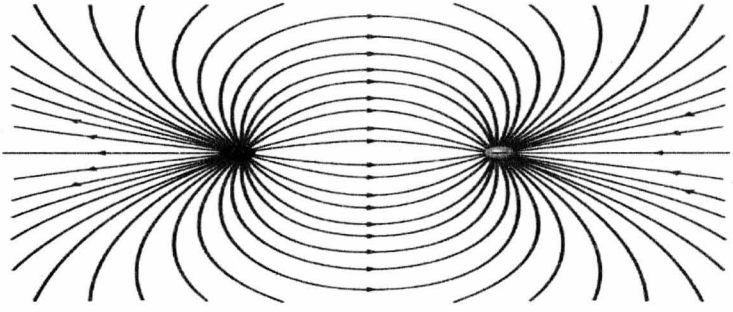
ودون معرفة بالرياضيات كتب واحدًا من أفضل المؤلفات التي كُتِبَت في الفيزياء، وهو يخلو تقريبًا من المعادلات، إنه يرى الفيزياء بعين عقله، وبعين العقل يخلق العوالم، كان جيمس كلارك ماكسويل أرستوقراطيًّا

اسكتلنديًّا ثريًّا وأحد أبرز علماء الرياضيات في القرن التاسع عشر، وعلى الرغم من الفرق الشاسع بينهما في الأسلوب الفكري والأصل الاجتماعي، فقد نجحا في فهم أحدهما الآخر، وبالجمع بين نوعين من العبقرية تعاونا معًا وفتحا الطريق أمام الفيزياء الحديثة.

كان المعروف عن الكهرباء والمغناطيسية في بداية القرن الثامن عشر قليلًا لا يتجاوز الخدع المسلية المقدمة في المعارض التي تظهر أعوادًا زجاجية تجذب قطعًا من الورق، ومغناطيسات تتنافر وتتجاذب، استمرت دراسة الكهربية والمغناطيسية ببطء طوال القرن الثامن عشر، واستمرت في القرن التاسع عشر، حيث نرى فاراداي يعمل في معمل في لندن يعج بالبكرات والإبر والسكاكين والأقفاص الحديدية يستكشف كيف تتجاذب وتتنافر الأشياء الكهربية والمغناطيسية، ونظرًا لتأثره الجيد بنيوتن، فلقد حاول فهم القوة الفعالة بين الأشياء المشحونة والأشياء المغناطيسية، إلا أنه رويدًا رويدًا قادته يداه التي احتكَّت عن قرب بهذه الأشياء إلى التوصل إلى حدس سيصبح أساس الفيزياء الحديثة، فلقد «رأى» شيئًا جديدًا.

تمثل حدسه في أنه يجب ألا نفكر في وجود قوة تؤثر مباشرة بين الأشياء البعيدة كما افترض نيوتن، بل يجب أن نفكر في وجود كيان منتشر عبر الفضاء، تعدله الأجسام الكهربية والمغناطيسية، ويؤثر بدوره (دفعًا وجذبًا) على الأجسام، واليوم يطلق على هذا الكيان الذي خمن فاراداي وجوده: المجال.

إذًا، ما هو المجال؟ يرى فاراداي أنه مكوَّن من حزم من الخيوط الرفيعة للغاية (متناهية الرفع) تملأ الفضاء؛ أي شبكة عنكبوتية عملاقة غير مرئية تملأ كل شيء حولنا، ويطلق على هذه الخيوط «خيوط القوة»؛ لأن هذه الخيوط «تنقل القوة» بطريقة ما؛ حيث تنقل القوة الكهربية والقوة المغناطيسية من جسم إلى آخر، كما لو كانت كابلات تسحب وتدفع (انظر الشكل (٢-٤)).



الشكل (٢ - ٤): خيوط المجال تملأ الفراغ، وخلال هذه الخطوط يتفاعل جسمان مشحونان كهربيًا، وقوة هذان الجسمان «تحملها» خيوط القوة الموجودة في المجال.

أي جسم ذو شحنة كهربية (مثل عود زجاجي محكوك) يشوه المجالين الكهربي والمغناطيسي (الخطوط) حول نفسه، وهذين المجالين بدورهما ينتجان قوة على كل جسم مشحون مغمور فيهما؛ ولذلك فأي جسمين بعيدين مشحونين لا يتجاذبان أو يتنافران «مباشرةً» بل يتجاذبان أو يتنافران فقط عبر الوسط الذي يتوسطهما.

إذا أخذت قطعتين من المغناطيس بين يديك ولعبت بهما، فقربتهما تارة وباعدت بينهما تارةً أخرى على نحو متكرر، وشعرت بالقوة التي تجذبهما وتنفرهما، فلن يكون من الصعب أن يراودك الحدس نفسه الذي راود فاراداي، وأن «تشعر» من خلال هذه التأثيرات «بالمجال» المحصور بين المغناطيسين.

هذه الفكرة مختلفة جذريًا عن فكرة القوة العاملة بين جسمين بعيدين التي طرحها نيوتن، ورغم ذلك، فإن هذه الفكرة كانت لتروق لنيوتن، فلقد كان نيوتن محتارًا من هذا التجاذب الذي يحدث عن بعد الذي قدمه بنفسه، فكيف يمكن للأرض أن تجذب القمر من على هذه المسافة البعيدة؟

كيف يمكن للشمس أن تجذب الأرض دون الاحتكاك بها؟ وكتب نيوتن في أحد الخطابات:

> لا يصدق أن المادة الجامدة غير العاقلة تسيطر وتؤثر على المواد الأخرى دون تدخل شيء آخر غير مادي، ودون احتكاك متبادل.[٥]

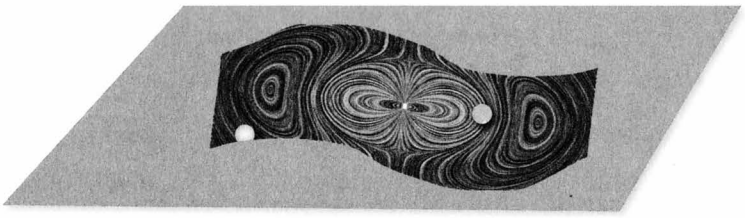
وفي نهاية الصفحة نجد أيضًا:

> إن كون الجاذبية فطرية ومتأصلة وأساسية في المادة لدرجة أن الجسم يمكن أن يؤثر على جسم آخر على مسافة منه عبر الفراغ دون وساطة أي شيء آخر يمكن أن ينتقل من خلاله العمل والقوة من أحدهما إلى الآخر، يبدو لي حماقة كبيرة لا أصدق أنه يمكن أن يقع فيها أي إنسان يمتلك من الناحية الفلسفية قدرة عالية على التفكير، فالجاذبية لا بد أن تكون ناتجة عن عامل يؤثر باستمرار وفقًا لقوانين معينة؛ أما كون هذا العامل مادي أم غير مادي، فتركته لتفكير قرائي.[٦]

يعتبر نيوتن أروع أعماله حماقة، ذلك العمل نفسه الذي سيُمْدح على مدار قرون تالية باعتباره أهم الإنجازات العلمية! لقد فهم أن التأثير عن بعد الذي تنص عليه نظريته لا بد أن يكون وراءه شيء آخر، لكنه لم يكن لديه فكرة عن ماهية هذا الشيء وترك المسألة حسب قوله ... «لتفكير قرائي»!

من صفات العباقرة: إدراك عيوب مكتشفاتهم حتى في حالة التوصل لنتائج هائلة مثل اكتشاف نيوتن لقوانين الميكانيكا والجذب العام، عملت نظرية نيوتن على نحو جيد جدًّا، واتضح أنها مفيدة للغاية لدرجة أنه لم يهتم أي شخص على مدار قرنين بالتشكيك فيها، إلى أن جاء فاراداي «القارئ» الذي ترك له نيوتن المسألة غير المحسومة، ووجد مفتاح فهم كيف تتمكن الأجسام من التجاذب والتنافر من عل مسافة بطريقة معقولة، ولاحقًا سيطبق أينشتاين حل فاراداي الرائع على نظرية الجاذبية التي وضعها نيوتن.

وعند تقديم الكيان الجديد المتمثل في المجال، ابتعد فاراداي جذريًّا عن علم الوجود الأنيق والبسيط من منظور نيوتن؛ فالعالم لم يعد مكونًا من جسيمات فحسب تتحرك في الفضاء مع مرور الزمن، بل ظهر على الساحة عاملًا جديدًا ألا وهو المجال، يدرك فاراداي أهمية الخطوة الجديدة التي يتخذها، ويوجد في كتابه فقرات جميلة يتساءل فيها إذا ما كان ممكنًا أن تكون خطوط القوة أشياء ذات وجود حقيقي، وبعد شكوك وتأملات مختلفة استنتج أنه يعتقد أن هذه الخطوط حقيقية بالفعل لكن «بالتردد المطلوب من العالم عند مواجهته لمسألة علمية بالغة العمق»،[٧] يدرك فاراداي أنه يشير إلى مجرد تعديل لبنية العالم بعد قرنين من النجاحات المتواصلة لفيزياء نيوتن (انظر الشكل (٢ -٥)).



الشكل (٢ - ٥): عالم فاراداي وماكسويل: الجسيمات والمجالات التي تتحرك في الفراغ مع مرور الزمن.

سرعان ما أدرك ماكسويل أنه وجد ضالته في هذه الفكرة، فترجم رؤية فاراداي التي عبر عنها بالكلمات فحسب إلى صفحة من المعادلات،* وتُعْرَف هذه المعادلات حاليًّا باسم معادلات ماكسويل، وتصف هذه المعادلات سلوك المجال الكهربي والمجال المغناطيسي، فهي النسخة الرياضية من «خطوط فاراداي».**

* تملأ المعادلات صفحة في أطروحة ماكسويل الأصلية، واليوم يمكن كتابة المعادلات نفسها في نصف سطر على النحو التالي: $dF = 0,\ d^*F = J$، وسرعان ما سنوضح السبب.

** إذا تخيلت المجال كمتجه (سهم) عند كل نقطة في الفراغ، فسوف تشير نقطة السهم =

اليوم تُسْتَخْدَم معادلات ماكسويل يوميًّا لوصف كل الظواهر الكهربائية والمغناطيسية، ولتصميم الهوائيات وأجهزة الراديو والمحركات الكهربائية وأجهزة الكمبيوتر، وهذا ليس كل شيء، فهذه المعادلات نفسها نحتاجها لتفسير كيفية عمل الذرات (فهي متماسكة بفعل القوى الكهربائية)، أو سبب تماسك جسيمات المادة المكونة للحجر، أو كيفية عمل الشمس، وتصف هذه المعادلات عددًا ونطاقًا مذهلين من الظواهر، وتقريبًا فإن كل ما نشهد حدوثه حولنا — باستثناء الجاذبية إلى جانب أمور أخرى قليلة — تصفها معادلات ماكسويل وصفًا جيدًا.

وما زال هناك ما هو أكثر، فهناك ما يعتبر على الأرجح النجاح العلمي الأجمل، حيث تخبرنا معادلات ماكسويل عن ماهية الضوء.

أدرك ماكسويل أن معادلات تتوقع قدرة خطوط فاراداي على الارتعاش والتموج مثل أمواج البحر، لقد حسب سرعة تحرك تموجات خطوط فاراداي، واتضح أن النتيجة كانت مماثلة لنتيجة الضوء! والسبب؟ أدرك ماكسويل أن الضوء ليس سوى هذا الارتعاش السريع لخطوط فاراداي! لم يقتصر الأمر على اكتشاف فاراداي وماكسويل لكيفية عمل الكهرباء والمغناطيسية، بل وبالطريقة نفسها وكنتيجة مصاحبة اكتشفا ماهية الضوء.

إننا نرى العالم من حولنا بالألوان، فما هو اللون؟ ببساطة، اللون هو تردد (سرعة تذبذب) الموجة الكهرومغناطيسية التي يتكون منها الضوء، وإذا زادت سرعة اهتزاز الموجة كان الضوء أكثر زرقة، وإذا اهتزت بمعدل أبطأ كان الضوء أكثر حمرة، فاللون كما نراه عبارة عن الاستجابة الفيزيائية النفسية للإشارة العصبية الصادرة عن مستقبلات العين التي تميز الموجات الكهرومغناطيسية ذات الترددات المختلفة.

إنني لأتساءل كيف كان شعور ماكسويل عندما أدرك أن معادلاته

= إلى اتجاه خطوط فاراداي، أي مماس خطوط فاراداي، وسيكون طول السهم متناسب مع كثافة خطوط فاراداي.

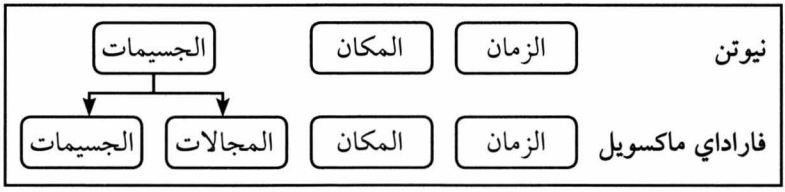
— التي كتبها لوصف البكرات والأقفاص الصغيرة والإبر الدقيقة في مختبر فاراداي — اتضح أنها تفسر طبيعة الضوء واللون ...

ومن ثم فالضوء ليس سوى الاهتزاز السريع لشبكة عنكبوت خطوط فاراداي التي تتموج مثل سطح البحيرة مع هبوب الرياح، وليس صحيحًا أننا «لا نرى» خطوط فاراداي، إننا نرى خطوط فاراداي المهتزة «فحسب»، إن «الرؤية» هي إدراك الضوء، والضوء هو حركة خطوط فاراداي، لا شيء ينتقل من مكان إلى آخر في الفراغ دون وجود شيء ينقله، فعندما نرى طفلًا يلعب على الشاطئ يكون السبب وجود بحيرة من الخطوط المهتزة بيننا وبينه تنقل لنا صورة الطفل، أليس العالم رائعًا؟

لا تتوقف روعة الاكتشاف عند هذا الحد فهناك المزيد، فالنتيجة النهائية للاكتشاف لها قيمة مادية بالنسبة لنا لا تُضَاهى، فلقد أدرك ماكسويل أن المعادلات تتوقع أيضًا قدرة خطوط فاراداي على التذبذب بترددات أقل، أي بترددات أبطأ من الضوء، ومن ثم، فلا بد من وجود موجات «أخرى» لم يسمع عنها أحد قط، ناتجة عن حركة الشحنات الكهربية التي تحرك بدورها شحنات كهربية، لا بد أنه من الممكن ذبذبة شحنة كهربية «هنا» وتكوين موجة تحرك تيارًا كهربيًّا «هناك»، وبعد عدة سنوات سيكتشف عالم الفيزياء الألماني هاينريش هرتز تلك الموجات التي توقعها ماكسويل نظريًّا؛ وبعد عدة سنوات أخرى سيصنع جولييلمو ماركوني أول جهاز راديو.

إن كل تكنولوجيا الاتصالات الحديثة المتمثلة في الراديو والتليفزيون والتليفونات وأجهزة الكمبيوتر والأقمار الصناعية والواي فاي والإنترنت وغيرها، ما هي إلا تطبيق لتوقع ماكسويل؛ فمعادلات ماكسويل هي أساس كل الحسابات التي يجريها مهندسو الاتصالات، لقد نشأ العالم المعاصر القائم على الاتصالات من تخمينات مجلِّد كتب فقير من لندن — مستكشف ماهر للأفكار يتمتع بخيال خصب — رأى في خياله بعض الخطوط؛ وعالم رياضيات ماهر ترجم تلك الرؤية إلى معادلات، وفهم أنه في طرفة عين

تستطيع موجات هذه الخطوط أن تنقل الأخبار من أحد جوانب الكوكب إلى الجانب الآخر.



الشكل (٢ - ٦): مم يتكون العالم؟

تقوم التكنولوجيا الحالية برمتها على استخدام شيء مادي، ألا وهو الموجات الكهرومغناطيسية التي لم تُكْتَشف تجريبيًّا، بل توقعها ماكسويل ببساطة عندما بحث عن وصف رياضي يفسر الحدس الذي راود فاراداي عندما رأى البكرات والإبر، هذه هي القوة المدهشة للفيزياء النظرية.

لقد تغير العالم ولم يعد مكونًا من جسيمات في المكان، بل أصبح مكونًا من جسيمات ومجالات في المكان (انظر الشكل (٢ -٦))، يبدو هذا التغيير بسيطًا، لكن بعد عدة قرون، سيستنتج شاب يهودي — يشعر كأن العالم كله بيته — نتائج من هذا القانون ستتجاوز خيال مايكل فاراداي المتقد بالفعل، وستكون هزة جديدة جذرية لعالم نيوتن.

الجزء الثاني
بداية الثورة

عدلت فيزياء القرن العشرين صورة نيوتن للعالم تعديلًا جذريًّا، وتعد هذه الخطوات الجديدة أساسًا لقدر كبير من التكنولوجيا المعاصرة، وتقوم زيادة فهمنا للعالم على نظريتين ألا وهما النظرية النسبية العامة وميكانيكا الكم، وكل منهما تتطلب إعادة تقييم جريء لأفكارنا التقليدية عن العالم، لا سيما المكان والزمان في النظرية النسبية؛ والمادة والطاقة في النظرية الكمية.

في هذا الجزء من الكتاب سوف أصف بقدر من التفصيل هاتين النظريتين، محاولًا توضيح معناهما الأساسي وإبراز الثورة المفاهيمية التي أحدثتاها، هنا يبدأ سحر فيزياء القرن العشرين، إن دراسة هاتين النظريتين وفهمهما بالتفصيل مغامرة ساحرة.

تمثل هاتان النظريتان — النسبية والكمية — الأساس الذي نبني عليه اليوم نظرية الجاذبية الكمية، إنهما الأساس الذي نحاول الانطلاق منه للأمام.

مكتبة
t.me/t_pdf

الفصل الثالث

ألبرت

بنى والد ألبرت أينشتاين محطات توليد كهرباء في إيطاليا، وكان ألبرت صبيًّا عندما كان عمر معادلات ماكسويل لا يتجاوز عقودًا قليلة، لكن إيطاليا كانت على مشارف ثورتها الصناعية، وكانت التوربينات والمحولات التي بناها والده قائمة بالفعل على هذه المعادلات، لقد كانت قوة الفيزياء الجديدة واضحة.

كان ألبرت متمردًا، فلقد تركه أبواه في ألمانيا للدراسة في المدرسة، لكنه وجد نظام المدرسة الألمانية شديد الصرامة وعسكريًّا، ولم يستطع تحمل تسلط المدرسة وترك دراسته، وانضم إلى والديه في إيطاليا في بافيا، وقضى وقته في التسكع، وسافر لاحقًا إلى سويسرا، وفشل في البداية في الالتحاق بالمعهد السويسري للتكنولوجيا في زيورخ كما رغب، وبعد سنوات الدراسة الجامعية لم يتمكن من العمل كباحث، ومن أجل أن يتمكن من العيش مع الفتاة التي كان يحبها، وجد وظيفة في مكتب براءة الاختراع في بيرن.

لم تكن تلك بوظيفة لائقة بشخص حاصل على مؤهل في الفيزياء، لكنها منحت ألبرت الوقت للتفكير والعمل باستقلالية، وبالفعل فكر وعمل، فعلى أية حال، هذا ما اعتاد ألبرت فعله منذ صباه، فقد كان يقرأ كتاب «العناصر» لإقليدس، وكتاب «نقد العقل الخالص» لكانط بدلًا من التركيز على ما يتعلمه في المدرسة، إن المرء لا يصل إلى الأماكن الجديدة باتباع الطرق المطروقة.

في سن الخامسة والعشرين أرسل أينشتاين إلى مجلة حوليات الفيزياء «أنالين دير فيزيك» ثلاثة مقالات، وكانت كل مقالة من هذه المقالات جديرة بالفوز بجائزة نوبل وأكثر من ذلك، وتمثل كل مقالة من المقالات الثلاث عمودًا من الأعمدة التي تدعم فهمنا للعالم، لقد تحدثت بالفعل عن أولى هذه المقالات التي حسب فيها ألبرت الشاب أبعاد الذرات، وأثبت بعد ثلاثة وعشرين قرنًا أن أفكار ديموقريطوس كانت صحيحة وأن المادة حُبَيْبِيَّة.

أما المقالة الثانية فهي التي يشتهر بها أينشتاين — فهي المقالة التي قدَّم فيها نظرية النسبية — وهذا الفصل مخصص للنظرية النسبية.

في الواقع، توجد نظريتان نسبيتان، فقد احتوى المظروف الذي أرسله أينشتاين الشاب البالغ من العمر خمسة وعشرين عامًا على شرح أولى هاتين النظريتين؛ وهي النظرية المعروفة اليوم باسم «النسبية الخاصة»، وهي توضيح مهم لبنية المكان والزمان، وسوف أوضحها هنا قبل أن أتطرَّق إلى النظرية الثانية، والأهم بين نظريات أينشتاين وهي: النسبية العامة.

النسبية الخاصة نظرية غامضة وأكثر صعوبة على المستوى المفاهيمي، واستيعابها أكثر صعوبة مقارنةً بالنسبية العامة، فلا تُحْبَط أيها القارئ إذا بَدَتْ لك الصفحات القليلة التالية مبهمة قليلًا، وتُظْهِر النظرية لأول مرة أن رؤية نيوتن للعالم لا ينقصها شيء فحسب بل تحتاج إلى التعديل الجذري على نحو يعارض تمامًا الحدس، إنها أول قفزة حقيقية لمراجعة فهمنا للعالم مفرط الاعتماد على الحدس.

الحاضر الممتد

تبدو نظريات نيوتن وماكسويل متناقضة مع بعضها البعض بطريقة غامضة، فمعادلات ماكسويل تحدد السرعة: سرعة الضوء، أما ميكانيكا نيوتن فليست متوافقة مع وجود سرعة أساسية؛ لأن ما يدخل معادلات

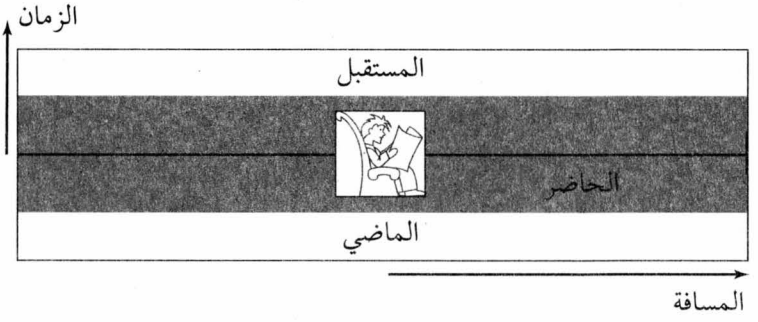
نيوتن هو التسارع وليس السرعة، ففي فيزياء نيوتن السرعة لا يمكن إلا أن تكون سرعة شيء «بالنسبة لشيء آخر»، أوضح جاليليو أن الأرض تتحرك بالنسبة للشمس، حتى لو لم ندرك هذه الحركة، لأن ما نطلق عليه عادةً اسم «السرعة» هو سرعة «بالنسبة للأرض»، إننا نقول: إن السرعة مفهوم «نسبي»، أي إنه لا معنى لسرعة شيء بنفسه، فالسرعة الوحيدة الموجودة هي سرعة الشيء بالنسبة لشيء آخر، هذا ما تعلمه طلبة الفيزياء في القرن التاسع عشر، وما يتعلمونه اليوم، لكن إذا كان هذا هو الحال، فإن سرعة الضوء التي حددتها معادلات ماكسويل هي سرعة بالنسبة إلى ماذا؟

هناك احتمالية تقضي بوجود طبقة سفلية عامة يتحرك الضوء بالنسبة لها وسرعته مساوية لسرعتها، إلا أن توقعات نظرية ماكسويل تبدو مستقلة عن هذه الطبقة السفلية، ولقد باءت بالفشل كل المحاولات التجريبية التي أُجْرِيَت في القرن العشرين لقياس سرعة الأرض بالنسبة لهذه الطبقة السفلية الافتراضية.

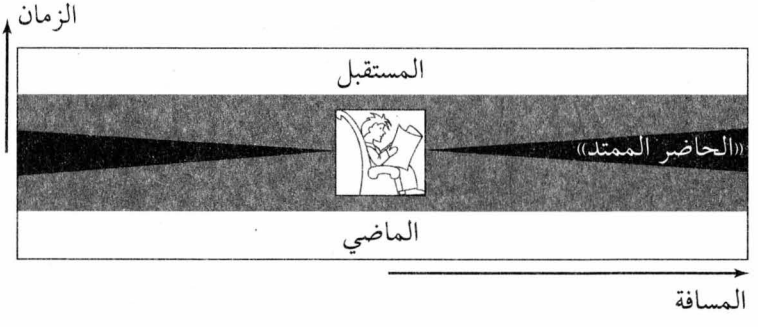
زعم أينشتاين أنه لم يَهْتَد إلى الطريق الصحيح من خلال أي تجربة بل من خلال التفكير في التناقض الواضح بين معادلات ماكسويل وميكانيكا نيوتن، وسأل أينشتاين نفسه إذا ما كانت توجد طريقة لتحقيق الاتساق بين الاكتشافات الأساسية التي توصل لها كل من نيوتن وجاليليو ونظرية ماكسويل.

وفي هذه الأثناء توصل أينشتاين إلى اكتشاف مذهل، ولفهم هذا الاكتشاف فكر في كل الأحداث الماضية والحاضرة والمستقبلية (بالنسبة للحظة التي تقرأ فيها حاليًا) وتخيلها موزعة على النحو الموضح في الشكل (٣ - ١).

يتمثل اكتشاف أينشتاين في خطأ هذا المخطط، في الواقع، الأشياء تظهر فعليًا كما هي موضحة في الشكل (٣ - ٢).



الشكل (٣ - ١): المكان والزمان قبل أينشتاين.



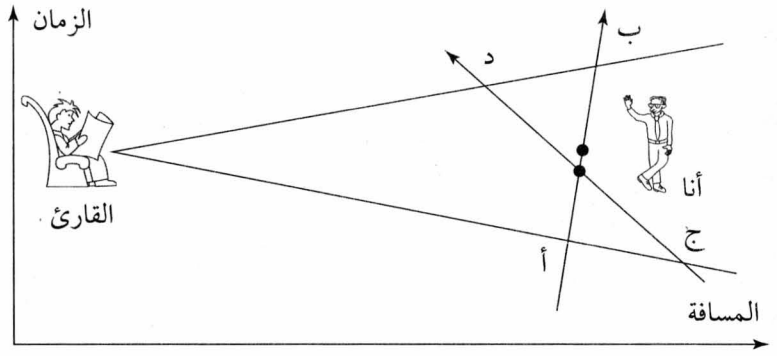
الشكل (٣ - ٢): بنية «الزمكان»، بالنسبة لكل مشاهد فإن «الحاضر الممتد» هو منطقة وسيطة بين الماضي والمستقبل.

فبين ماضي أحد الأحداث ومستقبله (على سبيل المثال، بين ماضيك ومستقبلك ومكانك وهذه اللحظة التي تقرأ فيها) توجد «منطقة وسيطة»، «حاضر ممتد»، منطقة ليست بماضٍ ولا مستقبل، هذا هو الاكتشاف الذي تحقق من خلال النسبية الخاصة.

مدة هذه المنطقة الوسيطة* — غير الموجودة في ماضيك أو في مستقبلك — صغيرة جدًّا وتعتمد على مكان حدوث الحدوث بالنسبة لك،

* مجموعة الأحداث على مسافة مكانية من حدث مرجعي.

كما هو موضح في الشكل (٣ -٣)، فكلما بعد عنك الحدث في المسافة زادت مدة الحاضر الممتد، فعلى مسافة أمتار قليلة من أنفك أيها القارئ تكون مدة المنطقة الوسيطة التي لا تمثل ماضيك أو مستقبلك لا تزيد عن بضعة نانو ثوان؛ أي تقريبًا لا شيء (فعدد النانو ثواني الموجودة في الثانية تماثل عدد الثواني الموجودة في ثلاثين سنة)، وهذا أقل بكثير مما يمكننا ملاحظته، على الجانب الآخر، فإن مدة هذه المنطقة الوسيطة تساوي ألفًا من الثانية، وهذا أيضًا أقل من مستوى إدراكنا للوقت — الحد الأدنى من الزمن الذي ندركه بحواسنا — الذي يعادل نسبيًّا عُشْر الثانية، أما على القمر فإن مدة الحاضر الممتد ثوانٍ قليلة، وعلى المريخ تعادل ربع ساعة، وهذا يعني أنه يمكن القول: إنه على المريخ توجد في هذه اللحظة الحالية أحداث وقعت بالفعل، وأحداث سوف تحدث، وأيضًا ربع ساعة تحدث خلالها أحداث ليست في ماضينا ولا في مستقبلنا.



الشكل (٣ - ٣): نسبية التزامن.

إنها في «مكان آخر»، لم ندرك قط هذا «المكان الآخر»؛ لأن هذا «المكان الآخر» وجيز جدًّا بالنسبة لنا؛ فنحن لا نتمتع بالسرعة الكافية لملاحظته، ورغم ذلك فإنه موجود وحقيقي.

ولهذا السبب من المستحيل إجراء محادثة غير متقطعة بيننا

وبين المريخ، لنقل: إنني على سطح المريخ وأنك هنا على الأرض، فأسألك سؤالًا وتجيبني بمجرد سماعك ما أقول، ويصلني ردك بعد ربع ساعة من توجيه السؤال، ومدة الربع ساعة هي وقت لا يمثل الماضي أو المستقبل بالنسبة للحظة التي أجبتني فيها، الحقيقة الأساسية التي فهمها أينشتاين عن الطبيعة هي أن مدة الربع ساعة حتمية ولا سبيل لتقليلها، إنها منسوجة في نسيج أحداث المكان والزمان، ولا يمكننا تقليلها إلا بقدر استطاعتنا إرسال خطاب إلى الماضي.

الأمر غريب، لكن هذه هي طبيعة العالم، الأمر غريب مثل حقيقة أن الناس في سيدني يعيشون بالمقلوب، أمر غريب لكنه حقيقي، يعتاد المرء على الحقيقة التي تصبح بعد ذلك طبيعية ومعقولة، وبنية المكان والزمان مصنوعة على هذا النحو.

وهذا يعني ضمنيًّا أنه من الهراء أن تقول عن حدث في المريخ: إنه يحدث «الآن»؛ لأن «الآنية» غير موجودة (انظر الشكل (٣ -٣)).* ومن الناحية التقنية، نقول: إن أينشتاين فهم أن «الآنية المطلقة» غير موجودة؛ فلا يوجد مجموعة أحداث في الكون تحدث «الآن»، فمجموعة الأحداث كلها الموجودة في الكون لا يمكن وصفها بأنها تعاقب مكون من «أحداث آنية»

---

* قد يعترض القارئ النبيه قائلًا: إن اللحظة الوسيطة في الربع ساعة يمكن أن تعتبر متزامنة مع جوابك، وسيدرك القارئ الذي درس الفيزياء أن هذا هو «اصطلاح أينشتاين» لتعريف التزامن، ويعتمد تعريف التزامن على طريقة الحركة، وبالتالي لا يعرف التزامن بين حدثين بل التزامن نسبةً إلى حالة حركة أجسام معينة، في الشكل (٣ -٣) توجد نقطة في منتصف الطريق ما بين النقطتين: (أ) و(ب)، وهما نقطة الخروج من ماضي المشاهد والدخول في مستقبله، وتوجد النقطة الأخرى في منتصف الطريق ما بين النقطة (ج) والنقطة (د)، وهما نقطة الخروج من ماضي المشاهد والدخول في مستقبله إذا تحرك في مسار آخر، كلتا النقطتين متزامنتين بالنسبة للمشاهد وفقًا لتعريف «التزامن» المذكور، لكنهما يحدثان في زمنين متعاقبين، وكلتا النقطتين متزامنتين بالنسبة للقارئ، لكنهما نسبيتان بالنسبة لحركتين مختلفتين من جانبي، ومن هنا جاء مصطلح «النسبية».

أو أحداث حاضرة، يتبع بعضها البعض، بل لها بنية أكثر تعقيدًا موضحة في الشكل (٣ -٢)، يصف الشكل ما يطلق عليه في الفيزياء الزمكان؛ إنه مجموعة الأحداث الماضية والمستقبلية كلها، لكنه أيضًا الأحداث التي «ليست ماضية ولا مستقبلية»؛ وهذه الأحداث لا تكون آن واحد، بل لها مدة.

في مجرة المرأة المسلسلة «أندروميدا» تبلغ مدة الحاضر الممتد (بالنسبة لنا) مليوني سنة، وكل ما يحدث خلال مدة المليوني سنة لا يعتبر من الماضي أو من المستقبل بالنسبة لنا، وإذا ما قررت حضارة أندروميدا المتقدمة سلميًا إرسال أسطول من المركبات الفضائية لزيارتنا، فسيكون من العبث أن نتساءل إذا ما كان الأسطول انطلق بالفعل «الآن» أو لم ينطلق بعدُ، ولا يكون السؤال منطقيًا إلا عندما نتلقى أول إشارة من الأسطول، ومنذ هذه اللحظة فصاعدًا — وليس قبل ذلك — يكون انطلاق الأسطول في ماضينا.

وكان لاكتشاف أينشتاين لبنية الزمكان في ١٩٠٥ نتائج مادية، إن حقيقة الارتباط الوثيق بين المكان والزمان — الموضحة في الشكل (٣ -٢) — تتضمن ضمنيًا إعادة بنية ميكانيكا نيوتن، وهذا ما فعله أينشتاين سريعًا في عام ١٩٠٥ وعام ١٩٠٦، وأولى نتائج إعادة هذه البنية تمثل في أنه مثلما يندمج المكان والزمان معًا في مفهوم الزمكان، فإن المجال الكهربي والمجال المغناطيسي يندمجان معًا بالطريقة نفسها فيما نطلق عليه اليوم المجال الكهرومغناطيسي، وتصبح المعادلات المعقدة التي كتبها ماكسويل عن المجالين بسيطة عندما تُكْتَب بهذه اللغة الجديدة.

توجد نتيجة أخرى للنظرية تنطوي على عواقب مهمة، فقد أصبح كل من مفهوم «الطاقة» ومفهوم «الكتلة» مجتمعين بالطريقة نفسها التي اندمج بها الزمان والمكان، واندمج المجال الكهربي والمجال المغناطيسي معًا في الميكانيكا الجديدة، وقبل عام ١٩٠٥ بَدَا أن حفظ الكتلة وحفظ الطاقة مبدئين عامين مؤكدين، وأكد المبدأ الأول علماء الكيمياء على نحو موسع،

فالكتلة لا تتغير في التفاعل الكيميائي، أما المبدأ الثاني المتمثل في حفظ الطاقة، فهو ناتج مباشرةً من معادلات نيوتن، واعتُبِرَ من أبرز القوانين التي «لا تقبل الجدال»، ورغم ذلك، أدرك أينشتاين أن الطاقة والكتلة وجهان لكيان واحد، تمامًا مثل المجالين الكهربي والمغناطيسي اللذان يمثلان وجهين للمجال نفسه، ومثلما يعد المكان والزمان وجهين لشيء واحد ألا وهو الزمكان، وهذا يعني أن الكتلة بنفسها ليست محفوظة، وأن الطاقة — كما كانت مفهومة في ذلك الوقت — ليست محفوظة على نحو مستقل هي أيضًا، فإحداهما يمكن أن تتحول إلى الأخرى، فلا يوجد إلا قانون واحد للحفظ وليس قانونين، فالمحفوظ هو مجموع الكتلة والطاقة، وليس كل منهما منفصلتين، ولا بد من وجود عمليات تحول الطاقة إلى كتلة أو الكتلة إلى طاقة.

وبحساب سريع عرف أينشتاين كم القدر الهائل من الطاقة الناتج عن تحويل جرام واحد من الكتلة، والنتيجة هي معادلة تكافؤ الكتلة والطاقة الشهيرة $E = mc^2$، ونظرًا لأن سرعة الضوء c تساوي رقمًا كبيرًا، ومربع سرعة الضوء c^2 يمثل رقمًا أكبر، فإن الطاقة الصادرة عن تحول جرام واحد من الكتلة تُعَدُّ طاقة هائلة؛ فهي طاقة ملايين من القنابل المنفجرة في آن واحد، وهي طاقة كافية لإنارة مدينة أو لتزويد صناعات بلدة بالطاقة لعدة أشهر، أو على العكس فهي من الممكن أن تدمر في لحظة حياة مئات الآلاف من الأشخاص في مدينة مثل هيروشيما.

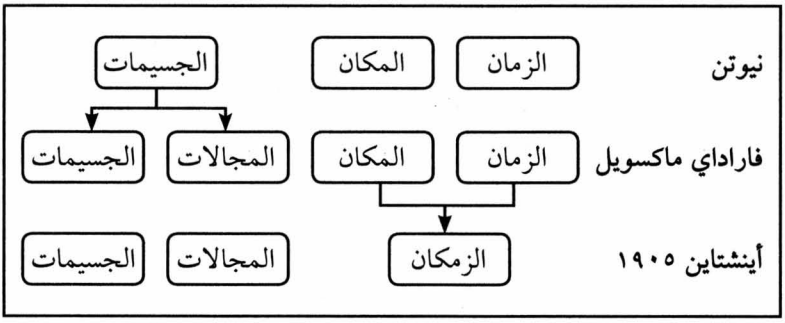
إن التخمينات النظرية لأينشتاين الشاب نقلت البشرية إلى عصر جديد؛ عصر الطاقة النووية، عصر احتمالات جديدة وأخطار جديدة، واليوم، بفضل ذكاء ذلك الشاب المتمرد الذي لا يطيق القواعد، نمتلك أجهزة لإضاءة منازل ١٠ مليار شخص سيسكنون الكوكب عما قريب، أو للسفر في الفضاء نحو النجوم الأخرى، أو لتدمير بعضنا البعض وتدمير الكوكب، فالأمر متوقف على اختياراتنا، وعلى القادة الذين نختارهم ليقرروا لنا.

اليوم؛ بنية الزمكان التي قدمها أينشتاين مفهومة جيدًا ومختبرة دوريًّا في المختبرات، وتعتبر راسخة على نحو حاسم، فالزمان والمكان مختلفان عن الطريقة التي كانا يُفْهَمان بها منذ عصر نيوتن، فالمكان لا يوجد مستقلًّا عن الزمان، وفي المكان الممتد الموضح في الشكل (٣ -٢)، لا يوجد جزء معين يحق له أكثر من غيره أن يطلق عليه «المكان الآن»، إن فكرتنا البديهية عن الحاضر — مجموعة الأحداث التي تحدث «الآن» في الكون — هو نتيجة عمانا، وعجزنا عن إدراك الفواصل الزمنية الصغيرة، إنها استقراء غير مشروع نابع من تجربتنا المحدودة.

إن الحاضر ليس إلا وهمًا مثل فكرة تسطح الأرض، لقد تخلينا الأرض مسطحة بسبب حواسنا المحدودة، فنحن لا نستطيع إلا أن نرى المدى القريب، فلو كنا سكنَّا كويكبًا قطره عدة كيلومترات مثل الأمير الصغير في الرواية التي تحمل الاسم نفسه؛ لأدركنا بسهولة أننا على كرة، ولو كانت عقولنا وحواسنا أكثر دقة؛ لأدركنا بسهولة النانو ثواني الموجودة في الوقت، وما كونا فكرة «الحاضر» الممتد في كل مكان، وكنا لندرك بسهولة وجود المنطقة الوسيطة بين الماضي والمستقبل، وكنا لندرك أيضًا أن قول «هنا والآن» منطقي، وأن قول «الآن» للإشارة إلى الأحداث «التي تحدث الآن» في كل أرجاء الكون ليس منطقيًّا، فالأمر يشبه التساؤل إذا ما كانت مجرتنا «أعلى أم أسفل» مجرة أندروميدا؛ فهذا سؤال غير منطقي؛ لأن «أعلى» أو «أسفل» لهما معنى فقط على سطح الأرض، وليس في الكون، فلا يوجد «فوق» أو «تحت» في الكون، وبالمثل، فلا يوجد دائمًا «قبل» و«بعد» بين حدثين في الكون، والبنية المتداخلة الناتجة التي يكونها الزمان والمكان معًا — الموضحة في الشكلين (٣ -٢) و(٣ -٣) — هي ما يطلق عليه علماء الفيزياء «الزمكان» (انظر الشكل (٣ -٤)).

عندما نشرت مجلة «أنالين دير فيزيك» مقالة أينشتاين الذي أوضح فيها فجأة كل هذه الأمور، كان تأثيرها على عالم الفيزياء بالغ الأهمية، فلقد

كان التناقض الواضح بين معادلات ماكسويل وفيزياء نيوتن معروفًا، ولم يعرف أحد السبيل إلى حله، لقد أذهل الجميع حل أينشتاين المدهش وبالغ البساطة، ويقال: إنه في القاعات القديمة خافتة الإضاءة في جامعة كراكوف، خرج أستاذ فيزياء صارم من مكتبه ملوحًا بمقالة أينشتاين وصاح: «وُلِدَ أرشميدس الجديد!»



الشكل (٣ - ٤): مم يتكون العالم؟

وعلى الرغم من الاعتراض الذي أثارته خطوات أينشتاين التقدمية عام ١٩٠٥، فإننا لم نصل بعدُ إلى أروع أعماله، فانتصار أينشتاين يتمثل في نظرية النسبية «الثانية»، نظرية «النسبية العامة» التي نشرها بعد عشر سنوات عندما أصبح في الخامسة والثلاثين من عمره.

نظرية «النسبية العامة» من أجمل النظريات التي وضعتها الفيزياء، وأول أعمدة الجاذبية الكمية، وهي أهم ما يتناوله هذا الكتاب، وهنا يبدأ سحر فيزياء القرن العشرين الحقيقي.

أجمل النظريات

بعد نشر نظرية النسبية الخاصة أصبح أينشتاين عالم فيزياء مشهور، وتلقى عروضًا للعمل في العديد من الجامعات، ورغم ذلك، ظل شيء

يؤرقه، ألا وهو عدم اتفاق النسبية الخاصة مع ما كان معروفًا عن الجاذبية، وأدرك ذلك أثناء كتابة مراجعة لنظريته، وتساءل إذا ما كان يجب إعادة النظر أيضًا في نظرية «الجاذبية العامة» المبجلة التي وضعها «نيوتن» أبو الفيزياء ليجعلها متوافقة مع نظرية النسبية التي وضعها.

من السهل فهم أصل المشكلة، لقد حاول نيوتن تفسير سبب سقوط الأشياء ودوران الكواكب، فتخيل وجود «قوة» تجذب كل الأجسام إلى بعضها البعض، وهذه القوة هي «قوة الجاذبية»، إلا أنه لم يكن مفهومًا الكيفية التي تتمكن من خلالها هذه القوة من جذب الأشياء البعيدة معًا دون وجود شيء بينها، وكما رأينا، فقد شك نيوتن نفسه في وجود أمر ناقص في الفكرة القائلة بوجود قوة مؤثرة بين الأجسام البعيدة غير المتلامسة، وأنه لكي تتمكن الأرض من جذب القمر لا بد من وجود شيء بينهما لينقل هذه القوة، وبعد مائتي عام، وجد فاراداي الحل، لكن ليس لقوة الجاذبية بل للقوة الكهربية والقوة المغناطيسية، وتمثل هذا الحل في المجال، فالمجالان: الكهربائي والمغناطيسي «يحملان» القوة الكهربية والمغناطيسية.

ومن الواضح في هذه المرحلة لأي شخص عاقل أنه لا بد لقوة الجاذبية أن يكون لديها خطوط فاراداي خاصة بها، وبالمثل أيضًا، فإن قوة الجذب بين الشمس والأرض، أو بين الأرض والأشياء الساقطة لا بد أن تكون راجعة إلى مجال، وفي هذه الحالة سيكون مجال الجاذبية، ومن الناحية المنطقية، لا بد من ألا يكون تطبيق الحل الذي اكتشفه كل من فاراداي وماكسويل على مسألة الأمر الذي يحمل القوة مقتصرًا على الكهرباء فحسب، بل يجب تطبيقه على الجاذبية أيضًا، لا بد من وجود مجال جاذبية، ووجود معادلات شبيهة بمعادلات ماكسويل تستطيع وصف طريقة حركة خطوط جاذبية فاراداي، وفي السنوات الأولى من القرن العشرين، كان هذا واضحًا لأي شخص يتمتع بقدر كافٍ من العقلانية، وهذا يعني أنه لم يكن واضحًا إلا لألبرت أينشتاين.

ولما كان أينشتاين مفتونًا منذ المراهقة بالمجال الكهرومغناطيسي الذي دفع الدوارات في محطة توليد الوقود التي يمتلكها والده، فقد بدأ يدرس مجال الجاذبية ويبحث عن نوع الرياضيات الذي يمكن أن يصفه، وكرس نفسه لهذه المسألة، واستغرق عشر سنوات لحلها، لقد قضى عشر سنوات مهووسًا بالدراسات والمحاولات والأخطاء والتخبط والأفكار الرائعة والأفكار الخاطئة، وسلسلة طويلة من المقالات المنشورة المحتوية على معادلات غير صحيحة، وأخطاء أخرى وتوتر، وأخيرًا عام ١٩١٥ نشر مقالة تحتوي على الحل الكامل الذي أسماه «النظرية النسبية العامة» التي تُعَد أروع أعماله، ويطلق عالم الفيزياء النظرية السوفيتي الأبرز ليف لانداو على هذه النظرية «أجمل النظريات».

وليس من الصعب معرفة سبب جمال النظرية، فبدلًا من مجرد اختراع الصيغة الرياضية لمجال الجاذبية ومحاولة ابتكار معادلات له، وجد أينشتاين المسألة الأخرى غير المحسومة في أقصى أعماق نظرية نيوتن وجمع بين المسألتين.

كان نيوتن قد عاد إلى فكرة ديموقريطوس التي تقول: إن الأجسام تتحرك في «الفضاء»، وهذا «الفضاء» لا بد أن يكون وعاءً كبيرًا خاويًا، وصندوقًا صلبًا يحتوي الكون، وسقالة هائلة تسير فيها الأشياء في خطوط مستقيمة إلى أن تؤثر عليها قوة تجعلها تنحني، لكن مم يتكون ذلك «الفضاء» الذي يحتوي الكون؟ وما هو «الفضاء»؟

بالنسبة لنا تبدو فكرة الفضاء طبيعية، لكن معرفتنا لفيزياء نيوتن هي ما تجعلها طبيعية بالنسبة لنا، وإذا ما تفكرنا في الأمر سنجد أن الفضاء الخالي ليس جزءًا من تجربتنا، فمن أرسطو إلى ديكارت، أي على مدار ألفي سنة لم تعتبر مطلقًا فكرة ديموقريطوس عن الفضاء ككيان غريب مختلف عن الأشياء فكرة معقولة، فكل من أرسطو وديكارت كان يرى أن الأشياء لها بعد، وأن هذا البعد صفة من صفات الأشياء، والبعد لا يوجد دون وجود

شيء يمكن مده، فمن الممكن أخذ الماء من الكوب، لكن الهواء سيملأ الكوب، فهل سبق ورأيت كوبًا خاليًا فعليًا؟

رأى أرسطو أنه إذا كان «لا يوجد شيء» بين الشيئين، فإنه لا يوجد شيء، فكيف يمكن أن يوجد شيء (فضاء) ولا شيء في الوقت نفسه، ما هو الفضاء الفارغ الذي تتحرك فيه الجسيمات؟ هل هو شيء أم هو لا شيء؟ فإذا كان لا شيء، فإنه غير موجود، ويمكننا الاستغناء عنه، أما إذا كان شيئًا، فهل من الممكن حقًا أن تكون صفته الوحيدة هي أن يكون موجودًا، ولا «يفعل» شيئًا؟

منذ العصور القديمة أتعبت المفكرين فكرة الفضاء الفارغ الذي هو بين الشيء واللاشيء، إن ديموقريطوس نفسه الذي جعل الفضاء الفارغ أساس العالم الذي تسير فيه الذرات لم يوضح بالتأكيد هذه المسألة، فكتب أن الفضاء الفارغ «شيء بين الوجود والعدم»: يقول سيمبليكيوس: «لقد افترض ديموقريطوس وجود الامتلاء والخواء، فأطلق على أحدهما «الوجود»، وأطلق على الآخر «عدم الوجود».[1] فالذرات هي الوجود، والفضاء هو عدم الوجود، ورغم ذلك فإنه «عدم وجود» موجود، إنه لمن الصعب التفوق على هذه الصعوبة.

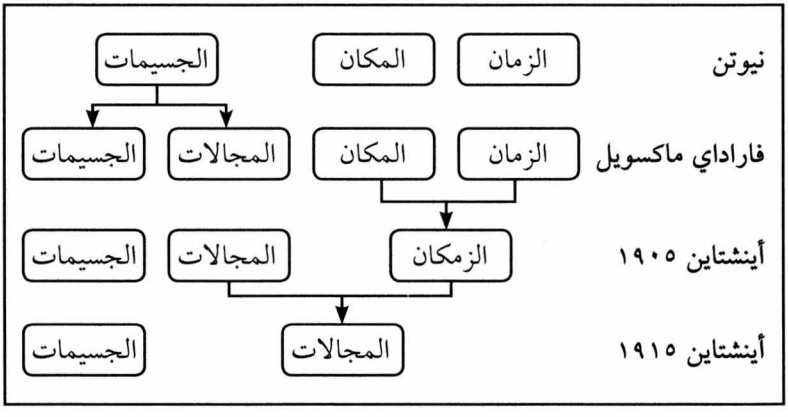
وحاول نيوتن الذي أحيا فكرة ديموقريطوس عن الفضاء أن يحل هذه الأمور قائلًا: إن الفضاء هو «عضو الإحساس» عند الرب، ولم يفهم أحد مطلقًا ما قصده نيوتن بقول: «عضو الإحساس عند الرب»، ومن المرجح أن نيوتن نفسه لم يفهم ما قاله، ومن المؤكد أن أينشتاين الذي لا يؤمن كثيرًا بفكرة الرب (صاحب عضو الإحساس أو الخالي من عضو الإحساس) إلا على محمل مجازي، وجد تفسير نيوتن لطبيعة الفضاء غير مقنع بالمرة.

عانى نيوتن كثيرًا في التغلب على مقاومة العلماء والفلاسفة لإحياء فكرة ديموقريطوس عن الفضاء، وفي البداية لم يأخذه أحد على محمل الجد، وفي النهاية لم تسفر الكفاءة البالغة لمعادلات نيوتن التي لطالما

كانت تتوقع النتائج الصحيحة إلا عن إخراس هذا النقد، إلا أن الشكوك المتعلقة بمصداقية مفهوم نيوتن عن الفضاء استمرت، وكان أينشتاين الذي قرأ أعمال الفلاسفة على دراية جيدة بانتقاداتهم، وكان إرنست ماخ الذي اعترف أينشتاين بتأثيره بسهولة، هو الفيلسوف الذي أبرز الصعوبات المفاهيمية لفكرة نيوتن عن الفضاء، وهو الشخص نفسه الذي لم يصدق وجود الذرات، (بالمناسبة، إن إرنست ماخ مثال جيد يوضح كيف يمكن أن يكون الشخص نفسه قصير النظر في أحد الأمور وبعيد النظر في أمر آخر).

ومن ثم، لم يواجه أينشتاين مشكلة واحدة بل اثنتين، أولًا، كيف يمكن وصف مجال الجاذبية؟ ثانيًا، ما هو فضاء نيوتن؟

وهنا جاءت فكرة أينشتاين بالغة العبقرية التي تُعَد أروع فكرة خارقة في تاريخ التفكير البشرية، حيث تساءل ماذا لو اتضح أن مجال الجاذبية هو بالفعل فضاء نيوتن الغامض؟ ماذا لو كان فضاء نيوتن ليس إلا مجال الجاذبية؟ إن هذه الفكرة بالغة البساطة والجمال والروعة هي نظرية النسبية العامة.



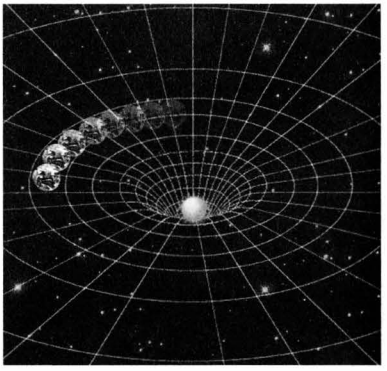
الشكل (٣ - ٥): مم يتكون العالم؟

فالعالم لا يتكون من مكان + جسيمات + مجال كهرومغناطيسي + مجال جاذبية، العالم يتكون من جسيمات + مجالات ولا شيء آخر؛

فلا حاجة إلى إضافة الفضاء كمكون إضافي، إن فضاء نيوتن «هو» مجال الجاذبية، أو معكوس ذلك الذي يقضي بقول الأمر نفسه، فمجال الجاذبية هو الفضاء (انظر الشكل (٣ -٥).

وعلى النقيض من فضاء نيوتن المسطح والثابت، فإن مجال الجاذبية بفضل كونه مجالًا يتحرك ويتموج ويخضع للمعادلات مثل مجال ماكسويل ومثل خطوط فاراداي.

إنه تبسيط هائل للعالم، فلم يعد الفضاء مختلفًا عن المادة، إنه من المكونات «المادية» للعالم، مثل المجال الكهرومغناطيسي، إنه كيان حقيقي يتموج ويتذبذب وينحني ويتعرج.



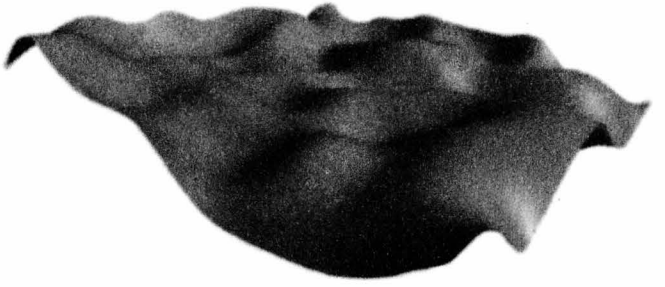
الشكل (٣ - ٦): تدور الأرض حول الشمس نظرًا لانحناء الزمكان حول الشمس مثل الحبة التي تدور على جدار القمع المنحني.

إننا لا تحتوينا سقالة متصلبة غير مرئية، بل مغمورون في حلزونة عملاقة مرنة (حسب تعبير أينشتاين المجازي)، فالشمس تحنى الفضاء حولها، ولا تدور الأرض حولها لأنها منجذبة بفعل قوة بعيدة غامضة، بل تسير مستقيمة في فضاء مائل، الأمر أشبه بحبة تدور في قمع، فلا يوجد قوى غامضة متولدة عن مركز القمع، بل إن جدران القمع المنحنية بطبيعتها

هي ما يوجه دوران الحبة، تدور الكواكب حول الشمس، وتسقط الأشياء لانحناء الفضاء حولها (انظر الشكل (٣ -٦)).

وبمزيد من التحديد فإن ما ينحني ليس الفضاء بل الزمكان، ذلك الزمكان الذي أوضح أينشتاين نفسه قبل عشر سنوات أنه كيان متكامل وليس سلسلة من اللحظات المتعاقبة.

هذه هي الفكرة، وكانت مشكلة أينشتاين الوحيدة هي إيجاد المعادلات ليجعلها مادية، فكيف يصف انحناء الزمكان؟ ولحسن حظ أينشتاين أن هذه المشكلة كانت قد حلها علماء الرياضيات بالفعل.



الشكل (٣ - ٧): سطح منحني (ثنائي الأبعاد).

لقد كتب كارل فريدريش غاوس «أمير علماء الرياضيات» وأبرز علماء الرياضيات في القرن التاسع عشر الرياضيات التي تصف الأسطح المنحنية، مثل أسطح التلال أو السطح الموضح في الشكل (٣ -٧).

ثم طلب من أحد طلابه الموهوبين تعميم هذه العملية الرياضية على الفضاءات المنحنية على نحو ثلاثي الأبعاد أو أكثر، وقدَّم الطالب برنارد ريمان أطروحة دكتوراه بَدَتْ عديمة الفائدة تمامًا.

تمثلت نتيجة ريمان أن خواص الفضاء المنحني (أو الزمكان) بأي بعد كان يصفها كائن رياضي نطلق عليه الآن انحناء ريمان، ونرمز له بالحرف «R»، إذا تخيلت منظرًا طبيعيًّا مكونًا من سهول وتلال وجبال سيكون

انحناء المنظر R صفر في السهول المسطحة — «الخالية من الانحناء» — ومختلف عن الصفر في الأماكن الموجود بها وديان وتلال؛ أي سيبلغ ذروته في الأماكن الموجود بها قمم جبال مدببة، أي عندما تكون الأرض غير مسطحة أو شديدة الانحناء، وباستخدام نظرية ريمان من الممكن وصف شكل الفضاءات المنحنية بالأبعاد الثلاثية أو الرباعية.

وبمزيد من الجهد وبطلب مساعدة الأصدقاء الأكثر تمرسًا في الرياضيات تعلم أينشتاين رياضيات ريمان وكتب معادلة كان فيها الانحناء R متناسبًا مع طاقة المادة، وهذا يعني أن الزمكان يكون أكثر انحناءً عندما توجد المادة، فالمعادلة تمثل نظيرًا لمعادلات ماكسويل لكنها في الجاذبية وليس في الكهرباء، تُكْتَب المعادلة في نصف سطر لا أكثر، إن تصور الفضاء المنحني أصبح معادلة.

إلا أن داخل هذه المعادلة يوجد كون زاخر، ويتجلى الثراء السحري للنظرية في صورة سلسلة التوقعات شديدة الغرابة التي تشبه تخاريف يهذي بها رجل مجنون، ويتضح في النهاية أنها كلها صحيحة، وحتى بداية ثمانينيات القرن العشرين لم يكد يتعامل أحد قط بجدية تامة مع أغلب هذه التوقعات الخيالية، إلا أن التجارب أثبتت صحتها واحدة تلو الأخرى، وسنتناول الآن بعضًا منها.

في البداية، أعاد أينشتاين حساب تأثير كتلة مثل الشمس على انحناء الفضاء المحيط بها، وتأثير هذا الانحناء على الكواكب، ووجد أن حركات الكواكب كما توقعتها معادلات كيبلر ونيوتن، لكن ليس بالضبط؛ لأنه بالقرب من الشمس يكون تأثير انحناء الفضاء أقوى من تأثير قوة نيوتن، وحسب أينشتاين حركة عطارد، أقرب الكواكب إلى الشمس، ومن ثم كان الفرق بين توقعات أينشتاين وتوقعات نظريات نيوتن أكبر ما يكون بالنسبة لهذا الكوكب، وتمثل الفرق الذي وجده في أن أقرب نقطة في مدار عطارد للشمس تتحرك سنويًّا بمعدل ٠,٤٣ ثانية قوسية على نحو يفوق ما

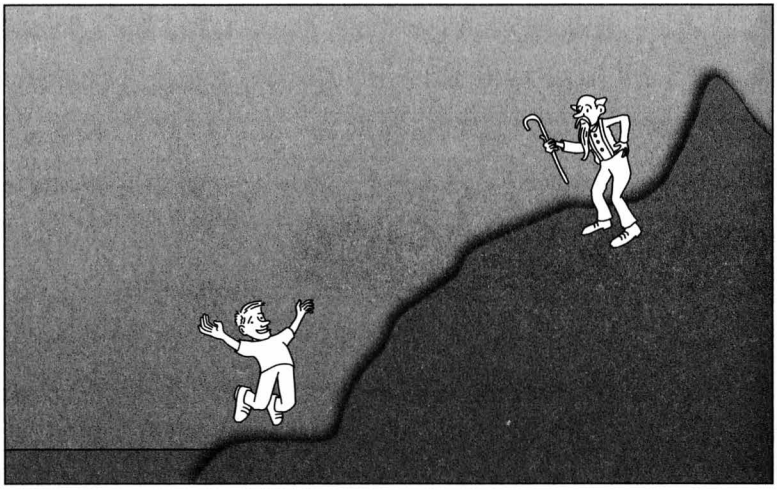
توقعته نظرية نيوتن، إنه فرق بسيط، لكن بالنسبة لما كان بقدرة علماء الفلك قياسه، وبمقارنة التوقعات مع ملاحظات علماء الفلك نرى أن الدليل قاطع؛ فكوكب عطارد يتبع المسار الذي توقعه أينشتاين، وليس المسار الذي توقعه نيوتن، إن عطارد، رسول الآلهة السريع، الإله صاحب الصندل المجنح، يتبع أينشتاين وليس نيوتن.

ومن ثم فإن معادلة أينشتاين تصف كيف ينحني الفضاء بالقرب الشديد من النجم، ونظرًا لهذا الانحناء ينحرف الضوء، لقد توقع أينشتاين أن الشمس تتسبب في انحناء الضوء حولها، وعام ١٩١٩ تمكن من قياس ذلك؛ فقاس انحراف الضوء، واتضح أنه متفق تمامًا مع توقعه.

إلا أن الفضاء ليس وحده ما ينحني، بل الزمن أيضًا، فقد توقع أينشتاين أن الزمن على الأرض يمر أسرع في الأماكن الأعلى ارتفاعًا، ويمر أبطأ في الأماكن الأقل ارتفاعًا، وقِيس ذلك، وثبت أنه حقيقي، واليوم لدينا ساعات شديدة الدقة في الكثير من المختبرات، ومن الممكن قياس هذا التأثير الغريب حتى بالنسبة لاختلاف في الارتفاع قدره بضعة سنتيمترات، فإذا وضعت ساعة على الأرض وساعة على الطاولة ستجد أن الساعة الموجودة على الأرض تسجل مرورًا أبطأ للزمن مقارنةً بالساعة الموجودة على الطاولة، فما السبب؟ السبب هو أن الزمن ليس عامًّا وليس ثابتًا، بل يتمدد ويتقلص وفقًا لقرب الكتل؛ والأرض مثل بقية الكتل تشوه الزمكان وتبطئ الزمن بالقرب منها، ونسبيًّا إلى حد ما سنجد أنه إذا كان لدينا توأم، وعاش أحدهما عند مستوى البحر وعاش الآخر فوق الجبال فإنهما عند لقائهما مرة أخرى سيبدو أحدهما أكبر عمرًا من الآخر (انظر الشكل (٣ -٨)).

وهذا التأثير يُفَسِّر على نحو مثير سبب سقوط الأشياء، فإذا نظرت إلى خريطة العالم وإلى الطريق الذي تسلكه الطائرة التي تحلق من روما إلى نيويورك، ستجد أنه لا يبدو مستقيمًا، فالطائرة ترسم قوسًا نحو الشمال، لماذا؟ لأنه نظرًا لانحناء الأرض فإن العبور إلى الشمال أقصر من السير

في خط موازٍ، فالمسافات بين خطوط الطول تصبح أقصر كلما اقتربنا من الشمال؛ ولذلك فمن الأفضل أن تتوجَّه نحو الشمال لتقصر الطريق (انظر الشكل (٣ - ٩)).

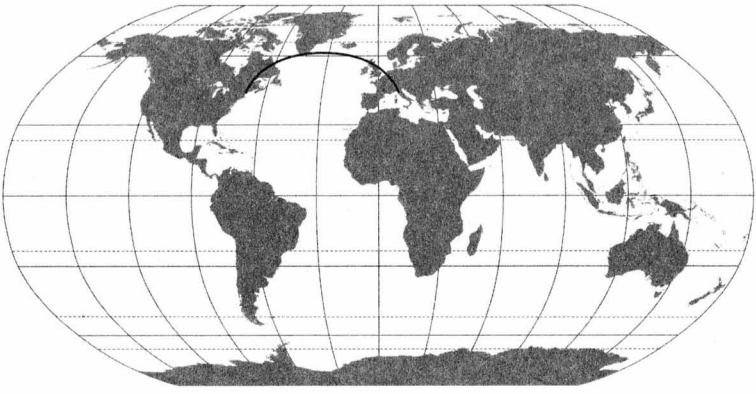


الشكل (٣ - ٨): توأم قضى أحدهما عمره في مكان في مستوى سطح البحر، والآخر فوق الجبال، وعند لقائهما مرةً أخرى، كان الشخص الذي عاش في الجبال أكبر عمرًا، وهذا هو تمدد الزمن الثقالي.

حسنًا، صدِّق أو لا تصدق، فإن الكرة المقذوفة لأعلى تسقط للسبب نفسه: فهي «تكسب وقتًا» بالتحرك لأعلى؛ لأن الوقت يمر بسرعة مختلفة في الأعلى، وفي كلتا الحالتين، فإن الطائرة والكرة تتبعان مسارًا مستقيمًا في فضاء (أو زمكان) منحنٍ (انظر الشكل (٣ - ١٠)).*

* تتبع الطائرة والكرة خطًّا جيوديسيًّا في الفضاء المنحني، وفي حالة الكرة تقدر الهندسة تقريبيًّا من خلال دالة المسافة الآتية: $ds^2 = (1 - 2\Phi(x))\ dt^2 - dx^2$، حيث $\Phi(x)$ تمثل الجهد النيوتوني، ويختزل تأثير مجال الجاذبية في تمدد الوقت مع الارتفاع، (سيلاحظ القارئ الذي يعرف النظرية عكس الإشارة الغريب: فالمسار المادي يزيد الزمن الحقيقي).

إلا أن توقعات النظرية تتجاوز هذه التأثيرات البسيطة، فالنجوم تلمع طالما امتلكت مخزونًا كافيًا من الهيدروجين — وقودها — ثم تموت، أما المادة المتبقية فلا تظل مدعومة بضغط الحرارة وتنهار بفعل وزنها، وعندما يحدث ذلك لنجم كبير على نحو كافٍ، يكون وزنه كبير جدًّا لدرجة أن المادة تنضغط لدرجة هائلة، وينحني الفضاء بشدة لينخفض مكونًا ثقبًا حقيقيًّا يطلق عليه الثقب الأسود.



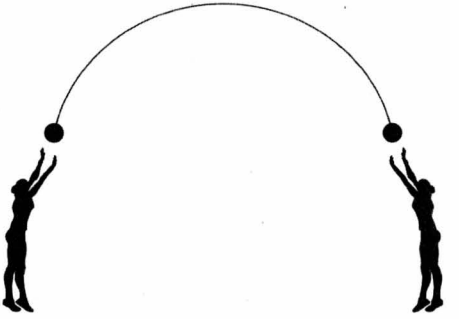
الشكل (٣ - ٩): كلما اتجهت نحو الشمال، قلَّت المسافة بين خطَّي الطول.

عندما كنت طالبًا في الجامعة كانت تعتبر الثقوب السوداء نتيجة غير معقولة لنظرية غامضة، واليوم يرصد علماء الفلك الثقوب السوداء بالمئات ويدرسونها بالتفصيل، ويقع أحد هذه الثقوب السوداء — الذي تعد كتلته أكبر بمليون مرة من الشمس — في مركز مجرتنا، فنحن نستطيع مشاهدة النجوم التي تدور حوله، وبعض النجوم التي تمر على مسافة شديدة القرب منه يدمرها بجاذبيته الهائلة.

علاوة على ذلك، تتوقع النظرية تموج الفضاء مثل سطح البحر، وأن هذه التموجات عبارة عن موجات شبيهة للموجات الكهرومغناطيسية التي

يتكون منها التليفزيون، ويمكن ملاحظة تأثيرات «موجات الجاذبية» في السماء على النجوم الثنائية: فهذه النجوم الثنائية تطلق هذه الموجات وتفقد طاقتها وتسقط ببطء بجوار بعضها البعض.* وفي أواخر عام ٢٠١٥ رصد مباشرة هوائي على الأرض موجات ثقالية ناتجة عن ثقبين أسودين، وعندما أعلن عن ذلك في أوائل عام ٢٠١٦ عقدت الدهشة لسان العالم مرةً أخرى، لقد اتضح مرةً أخرى أن التوقعات التي تبدو مجنونة التي تقول بها نظرية أينشتاين حقيقية تمامًا.

بالإضافة إلى ذلك، فقد توقعت النظرية أيضًا أن الكون يتمدد ونشأ عن انفجار كوني منذ ١٤ مليار سنة، وسوف أتناول هذا الموضوع بمزيد من التفصيل عما قريب.



الشكل (٣ - ١٠): كلما زاد ارتفاع الشيء، مر الوقت أسرع بالنسبة له.

إن مجموعة الظواهر الثرية والمعقدة — المتمثلة في انحناء أشعة الضوء وتعديل قوة نيوتن وتباطؤ الساعات، وتمدد الكون، والانفجار العظيم «البيج بانج» — كلها نابعة من إدراك أن الفضاء ليس وعاءً جامدًا ثابتًا، بل يمتلك حركة و«فيزياء» خاصة به، تمامًا مثل المادة والمجالات الأخرى

* تظهر مشاهدات النظام النجمي الثنائي PSR B1913 + 16 أن النجمين اللذين يدور أحدهما حول الآخر يصدران هذه الأمواج الثقالية، وبسبب هذه المشاهدات ربح راسل هالس وجوزيف تايلور جائزة نوبل عام ١٩٩٣.

التي يحتويها، وكان ديموقريطوس نفسه ليبتسم مسرورًا لو استطاع أن يرى أن فكرته عن الفضاء سيكون لها هذا التأثير الهائل، صحيح أنه أطلق عليها اللاوجود، لكن ما قصده بالوجود هو المادة، وكتب أن اللاوجود أو الخواء المقصود يمتلك رغم ذلك «فيزياء معينة (طبيعة) وله جوهر خاص به».* فلكم كان محقًّا!

بدون فكرة المجالات التي قدمها فاراداي، وبدون قوة الرياضيات المدهشة، وبدون هندسة جاوس وريمان لظلت هذه «الفيزياء المعينة» غير مفهومة، فبمساعدة الأدوات المفاهيمية الجديدة وبفضل الرياضيات كتب أينشتاين المعادلات التي تصف خواء ديموقريطوس، ووجد «لفيزيائه المعينة» عالمًا متنوعًا ومدهشًا تنفجر فيه الأكوان، ويتحول فيه الفضاء إلى ثقوب سحيقة، ويتباطأ فيه الزمن بالقرب من الكواكب، وتتموج فيه مساحات الفضاء بين النجمي الشاسعة وتتمايل مثل سطح البحر ...

يبدو كل هذا كما لو كان حكاية تعج بالصخب والضجيج يرويها أحد المعاتيه ولا تدل على شيء، وعلى الرغم من ذلك، فإنها نظرة على الواقع، أو بالأحرى هي لمحة من الواقع أقل احتجابًا عن نظرتنا اليومية له الضبابية والعادية، إنه واقع يبدو كما لو كان مكونًا من الأمور نفسها التي تتكون منها أحلامنا، لكنه أكثر واقعية من أحلامنا اليومية المشوشة.

وكل هذا ليس إلا نتيجة لحدس بدائي يتمثل في أن الزمكان والمجال الجاذبي شيء واحد، ومعادلة بسيطة لم أستطع مقاومة عدم كتابتها هنا على الرغم من أن معظم القراء لن يتمكنوا من فهمها بالتأكيد، ونقلتها على أية حال على أمل أنهم قد يتمكنوا من ملاحظة بساطتها الجميلة:

$$R_{ab} - \tfrac{1}{2} R g_{ab} + \Lambda g_{ab} = 8\pi G\, T_{ab}$$

في عام ١٩١٥ كانت المعادلة لا تزال أبسط؛ لأن المصطلح $+\Lambda g_{ab}$

* بلوتارخ، كتاب «بلوتارخ ضد كولوتيس» ٤، ١١٠٨، تتضمن كلمة «طبيعة» معنى «طبيعة الشيء».

الذي أضافه أينشتاين بعد عامين (والذي سوف أتناوله لاحقًا) لم يكن موجودًا.* يعتمد R_{ab} على انحناء ريمان، ويمثل مع $\frac{1}{2} Rg_{ab}$ يمثل انحناء الزمكان؛ يمثل T_{ab} طاقة المادة؛ وتمثل G الثابت نفسه الذي وجده نيوتن، فهو الثابت الذي يحدد مدى قوة الجاذبية.

هذا هو الأمر، إنها رؤية ومعادلة.

الرياضيات أم الفيزياء؟

أود التوقف قبل الاستمرار في تناول الفيزياء لأوضح بعض الملاحظات بخصوص الرياضيات، لم يكن أينشتاين عالم رياضيات عظيم، لقد كان يجد صعوبات في فهم الرياضيات، وقد قال لك بنفسه عندما أجاب بالطريقة التالية عام ١٩٤٣ على طفلة عمرها تسع سنوات اسمها باربرا كتبت إليه عن الصعوبات التي تواجهها في هذا الصدد فقال: «لا تقلقي من مواجهة هذه الصعوبات في فهم الرياضيات، فأنا أؤكد لكِ أن مشاكلي أكثر منك صعوبة!»[٢] وبَدَا الأمر كمزحة، لكن أينشتاين لم يكن يمزح، لقد كان يحتاج مساعدة في فهم الرياضيات، وكان يشرحها له زملائه من الطلبة والأصدقاء الذين يتمتعون بالصبر أمثال مارسيل جروسمان، لقد كان حدسه كعالم فيزياء هو ما كان مدهشًا.

أثناء السنة الأخيرة التي كان يكمل فيها تكوين النظرية، وجد أينشتاين نفسه في منافسة مع ديفيد هيلبرت الذي يُعَد أحد أهم علماء الرياضيات على مر العصور، فلقد كان أينشتاين يلقي محاضرة يحضرها هيلبرت في جوتنجن، وأدرك هيلبرت على الفور أن أينشتاين كان بصدد التوصل لاكتشاف عظيم، وفهم الفكرة وحاول أن يسبق أينشتاين ويكون أول من

* يسمى هذا المصطلح «كونيًا» لأن تأثيره يحدث فقط على مسافة بالغة الكبر، أو على مسافات «كونية»، ويسمى الثابت Λ «الثابت الكوني»، وقاس قيمته في نهاية تسعينيات القرن العشرين ثلاثة من علماء الفضاء هم: سول بيرلموتر وبريان بي شميت وآدم جي ريس

يكتب المعادلات الصحيحة للنظرية الجديدة التي كان أينشتاين يكونها ببطء، كان السباق نحو خط النهاية بين هذين العملاقين أمرًا شديد الإثارة، وحُسِمَ في النهاية في غضون أيام قلائل، فقد انتهى الأمر بأينشتاين بإلقاء محاضرة عامة في برلين كل أسبوع تقريبًا، وكان يقدم في كل مرة معادلة مختلفة، حيث كان متلهفًا إلى ألا يسبقه هيلبرت في التوصل إلى الحل، وفي كل مرة كانت المعادلة غير صحيحة، وفي النهاية توصل أينشتاين بشق الأنفس — متقدمًا نسبيًّا على هيلبرت — إلى المعادلة الصحيحة، وكسب أينشتاين السباق.

كان هيلبرت رجلًا نبيلًا ولم يشكك أبدًا في انتصار أينشتاين على الرغم من أنه كان يعمل على صياغة معادلات شديدة الشبه بمعادلات أينشتاين في ذلك الوقت، في الحقيقة، لقد ترك عبارة رقيقة وجميلة تصف تمامًا علاقة أينشتاين الصعبة مع الرياضيات، وربما العلاقة الصعبة الموجودة عمومًا بين الفيزياء ككل والرياضيات، لقد كانت الرياضيات اللازمة لصياغة النظرية هي الهندسة رباعية الأبعاد، وعن هذا قال هيلبرت:

> إن أي صغير في شوارع جوتنجن* يفهم الهندسة رباعية الأبعاد على نحو أفضل من أينشتاين لكن أينشتاين فقط هو من أكمل المهمة.

وما السبب في ذلك؟ لقد كان أينشتاين يتمتع بقدرة فريدة على «تخيل» الطريقة المحتمل أن يكون العالم مصممًا بها، وكان قادرًا على «رؤية» ذلك في مخيلته.

بالنسبة لأينشتاين كانت المعادلات تأتي في المرتبة الثانية؛ فهي اللغة التي يجعل بها رؤاه عن الواقع مادية، يرى أينشتاين أن نظرية النسبية العامة ليست مجموعة معادلات بل صورة ذهنية للعالم مترجمة بصعوبة في صورة معادلات.

* كانت مدينة جوتنجن التي يعمل فيها هيلبرت في ذلك الوقت مقر أهم كليات الهندسة.

الفكرة وراء النظرية هي انحناء الزمكان، فإذا كان الزمكان ثنائي الأبعاد فحسب، وكنا نعيش على ما يشبه السطح المنبسط، فسيكون من السهل تخيل المقصود «بانحناء الفضاء المادي»، فهذا سيعني أن الفضاء المادي الذي نعيش فيه لا يشبه الطاولة المستوية بل يشبه سطحًا به جبال ووديان، إلا أن العالم الذي نسكنه ليس ثنائي الأبعاد، بل ثلاثي الأبعاد، في الواقع، إنه رباعي الأبعاد إذا أضيف عنصر الزمن، إن تخيل فضاء رباعي الأبعاد أكثر صعوبة؛ لأننا في إدراكنا المعتاد لا نتصور وجود «فضاء أكبر» يمكن أن ينحني فيه الزمكان، إلا أن خيال أينشتاين لم يجد صعوبة في تصور الحلزون الكوني الذي يكتنفنا الذي يمكن أن ينضغط ويتمدد ويلتوي، والذي يشكل الزمكان المحيط بنا، وبفضل وضوح رؤية أينشتاين تمكَّن من أن يكون أول من يكتب هذه النظرية.

وفي النهاية حدث قدر من التوتر بين هيلبرت وأينشتاين، فقبل بضعة أيام من إعلان أينشتاين عن معادلته الناجحة كان هيلبرت قد أرسل إلى إحدى الدوريات العلمية مقالة توضح إلى أي مدى اقترب من التوصل إلى الحل نفسه، وحتى يومنا المعاصر تراود الشكوك المؤرخين العلميين عند محاولة تقييم إسهامات كل من هذين العملاقين، ففي مرحلة ما ساد الفتور علاقاتهما، وخشي أينشتاين من أن يحاول هيلبرت الأكثر منه خبرة وقوة عزو كثير من فضل تكوين النظرية لنفسه، ورغم ذلك، لم يزعم هيلبرت مطلقًا أنه أول من اكتشف النظرية النسبية العامة، وفي عالم العلوم الذي غالبًا وكثيرًا ما تصبح فيه الصراعات على الأسبقية صراعات مريرة؛ ضرب العالمين مثالًا رائعًا حقًّا في الحكمة، مما أخلى الساحة من كل أشكال التوتر السلبي.

كتب أينشتاين خطابًا رائعًا إلى هيلبرت يلخص بالغ إحساسه بالمسار المشترك الذي سلكاه:

في لحظة ما شعرت أنه راودنا نوع من الضيق، ولم أعد أرغب

في تحليل سبب ذلك، لقد قاومت المرارة التي أثارها فيَّ ذلك الشعور، ونجحت في ذلك تمامًا، وأنظر إليك مجددًا بعين الصداقة الخالصة، وأود أن تعاملني بالمثل، إنه لمن المؤسف حقًّا ألا يكون الفرح هو الشعور الغامر الذي يكتنف رفيقين مثلنا تمكنا من شق طريق بعيد عن حقارة هذا العالم.[٣]

الكون

بعد عامين من نشر المعادلة قرر أينشتاين استخدامها في وصف فضاء الكون ككل المتصور على أعلى نطاق، وهنا راودته فكرة أخرى من أفكاره المذهلة.

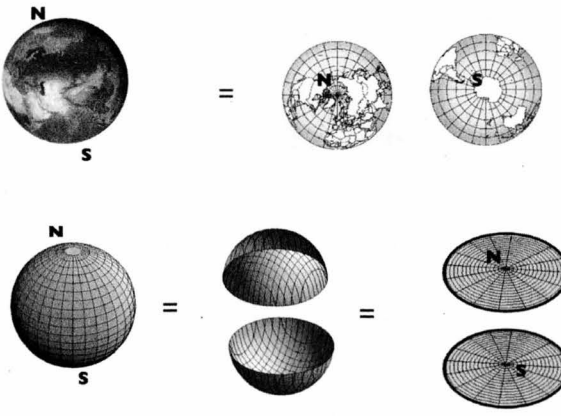
فعلى مدار آلاف السنوات تساءل البشر إذا ما كان الكون لا نهائيًّا أم له حد، وكلا الفرضين ينطوي على مشاكل شائكة، فالكون اللانهائي لا يبدو منطقيًّا، فمثلًا لو كان الكون لا نهائيًّا فيجب أن يوجد في مكان ما قارئ مثلك تمامًا يقرأ الكتاب نفسه (فاللانهائية شاسعة حقًّا، ولا توجد تركيبات ذرة كافية لملء اللانهائية بأشياء مختلفة دائمة عن بعضها البعض)، في الحقيقة، يجب ألا يقتصر الأمر على قارئ واحد، بل يجب أن يوجد سلسلة لا نهائية من القراء المطابقين لك ... أما لو كان يوجد حد لهذا الكون، فما هو ذلك الحد؟ ما المنطقي في حد ليس له حد على الجانب الآخر؟ وبالفعل في القرن السادس الميلادي في مدينة تارانتو كتب الفيلسوف الفيثاغوري أرخيتاس ما يلي:

إذا وجدت نفسي في أبعد سماء، تلك التي توجد بها النجوم الثابتة، فهل سأتمكن من مد يدي أو مد قضيب إلى ما وراء هذه السماء أم لا؟ سيكون من العبث ألا أستطيع فعل ذلك، لكن إذا استطعت فمعنى هذا أنه يوجد نطاق خارجي يمكن أن يكون

مكونًا من المادة أو من الفضاء، وبهذه الطريقة يمكن للمرء المضي قدمًا نحو النهاية، طارحًا بين الحين والآخر السؤال نفسه المتمثل في إذا ما كان سيوجد دائمًا نطاق يمكن أن يمد إليه القضيب.[٤]

إن هاتين الفرضيتين العبثيتين — عبثية الفضاء اللانهائي وعبثية الكون ثابت الحد — لم تتركا مجالًا لأي خيار عقلاني بينهما.

إلا أن أينشتاين وجد طريقًا ثالثًا تمثل في إمكانية أن يكون الكون «نهائيًا» و«ليس له حد» في الوقت نفسه، كيف؟ تمامًا مثلما يتسم سطح الأرض بأنه ليس لا نهائيًا وليس له حد أيضًا عند «انتهائه»، ويمكن حدوث هذا على نحو طبيعي في حالة انحناء الشيء، وسطح الأرض يتسم بالانحناء، وبالطبع في النظرية النسبية العامة يمكن أن ينحني أيضًا الفضاء ثلاثي الأبعاد، وبالتالي، يمكن أن يكون الكون نهائيًا وليس له حد.

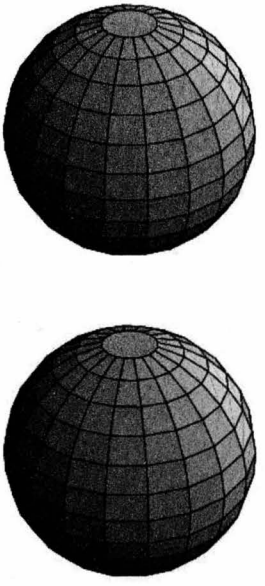


الشكل (٣ - ١١): يمكن أن تمثل الكرة في صورة قرصين مندمجين في الواقع اندماجًا متماهيًا من كل الحواف.

إذا سرت على سطح الأرض في خط مستقيم فلن أستمر في التقدم إلى ما لا نهاية، بل سأعود في النهاية إلى النقطة التي بدأت منها، ويمكن أن

يكون الكون مصمَّم بالطريقة نفسها؛ فإذا سافرت في مركبة فضائية وسرت في الاتجاه نفسه فسوف أطير حول الكون وأعود في النهاية إلى الأرض، ويُطْلَق على مثل هذا النوع من الفضاء ثلاثي الأبعاد النهائي وغير المحدود الكرة الثلاثية.

ولفهم هندسة «الكرة الثلاثية» دعونا نعود إلى الكرة العادية مثل سطح الكرة أو الأرض، فمن أجل تمثيل سطح الأرض على مسطح يمكننا أن نرسم قرصين كما هو معتاد عند رسم القارات (انظر الشكل (٣ -١١)).



الشكل (٣ - ١٢): يمكن تمثيل الكرة الثلاثية في صورة كرتين مندمجتين معًا.

لاحظ أن ساكن نصف الكرة الجنوبي «محاط» بطريقة معينة بنصف الكرة الشمالي؛ لأنه إذا سلك أي اتجاه لمغادرة نصف الكرة الجنوبي سوف ينتهي به الحال دائمًا إلى الوصول للنصف الشمالي الآخر، وعكس ذلك صحيح أيضًا على نحو واضح، فكل نصف كرة «يحيط» بالآخر و«محاط» به،

ويمكن تمثيل الكرة الثلاثية بطريقة مشابهة، لكن مع إضافة بعد إضافي لكل شيء، فتصبح كرتين ملتصقتين من كل الحواف (انظر الشكل (٣ -١٢)).

عندما نغادر كرةً فإننا ندخل في الأخرى، تمامًا مثلما نغادر قرصًا في تمثيل الكرة وندخل في القرص الآخر، فكل كرة تحيط بالأخرى ومحاطة بالأخرى، تتمثل فكرة أينشتاين في أن الفضاء يمكن أن يكون كرة ثلاثية؛ أي شيء له حجم نهائي (محصلة حجم الكرتين)، لكن ليس له حدود،* الكرة الثلاثية هي الحل الذي قدمه أينشتاين في مقالته عام ١٩١٧ لمشكلة حد الكون، وبدأت هذه المقالة علم الكونيات المعاصر المتمثل في دراسة الكون المرئي بأكمله دراسة على أكبر نطاق، ومن هنا سيظهر اكتشاف تمدد الكون، ونظرية الانفجار العظيم «البيج بانج»، ومسألة ميلاد الكون، والكثير من الأمور الأخرى، وسأتناول كل هذه الموضوعات في الفصل الثامن.

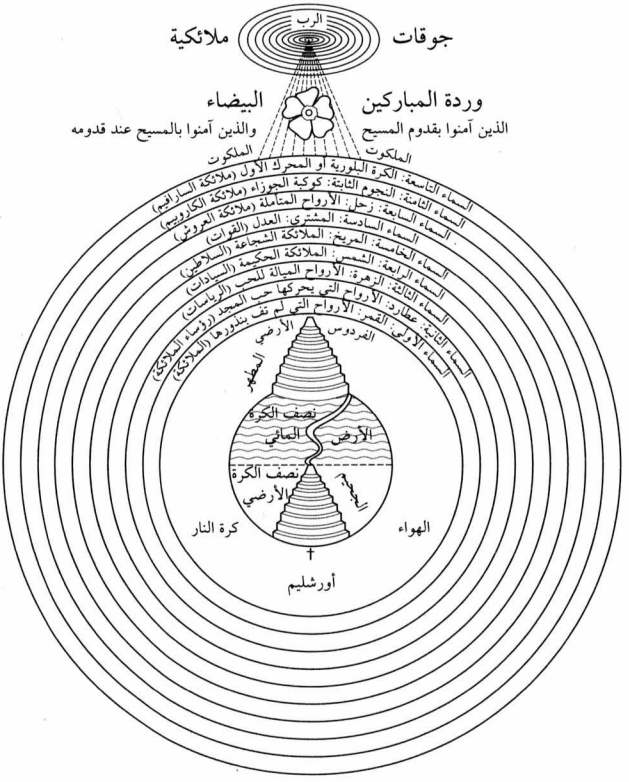
هناك ملاحظة أخرى أريد توضيحها بشأن كرة أينشتاين الثلاثية، على الرغم من أن الأمر قد يبدو مذهلًا، فإن هذه الفكرة نفسها تصورها بالفعل عبقري آخر من كون ثقافي مختلف كليًّا ألا وهو دانتي أليجييري الشاعر الإيطالي العظيم، في جزء «الفردوس» الذي يعد الجزء الثالث من قصيدته الكبيرة «الكوميديا الإلهية»، يقدم دانتي تصورًا هائلًا للعالم في العصور الوسطى على غرار عالم أرسطو، تقع فيه الأرض الكروية في المركز ويحيط بها الكرات السماوية (انظر الشكل (٣ -١٣)).

يصعد دانتي بصحبة حبيبته بياتريشي المتألقة هذه الكرات في رحلة حالمة رائعة إلى الكرة الخارجية، وعندما يصل لها يتأمل الكون أسفل منه بسماواته الدوارة والأرض الموجودة بالأسفل جدًّا في مركزه، وبعد ذلك ينظر لأعلى، فماذا يرى؟ يرى دانتي نقطة ضوء محاطة بكرات هائلة من

* الكرة هي مجموعة النقاط في R^3 الذي تحدده المعادلة $x^2+y^2+z^2=1$، الكرة الثلاثية هي مجموعة النقاط في R^4 التي تحددها المعادلة $x^2+y^2+z^2+u^2=1$.

الملائكة، أي بكرة هائلة أخرى «تحيط وفي الوقت نفسه محاطة» بكرة كوننا! كما قال دانتي، إليكم أشعار دانتي من المقطع ٢٧ من قصيدة «الفردوس»: «هذا الجزء من الكون يحيط بالجزء الأول في دائرة مثلما يحيط الجزء الأول الأجزاء الأخرى»، وفي المقطع التالي، متحدثًا عن «الدائرة» الأخيرة فيقول إنها: «تبدو محاطة بالدوائر التي تحيط بها»، تحيط نقطة الضوء وكرة الملائكة بالكون، وفي الوقت نفسه الكون «يحيط» بهما! إنه وصف دقيق للكرة الثلاثية!

مخطط الفردوس



الشكل (٣ - ١٣): تمثيل تقليدي للكون من منظور دانتي.

إن الرسوم التقليدية التي توضح الكون من منظور دانتي الموجودة في الكتب الدراسية الإيطالية (انظر الشكل (٣ -١٣)) تضع الكرات الملائكية منفصلة عن الكرات السماوية، إلا أن دانتي كتب أن الكرتين «تحيط» إحداهما الأخرى و«محاطة» كل منهما بالأخرى، إن دانتي لديه حدس هندسي واضح تجاه الكرة الثلاثية.*

كان أول من لاحظ أن قصيدة «الفردوس» تصف الكون ككرة ثلاثية هو عالم رياضيات أمريكي يُدْعَى مارك بيترسون في عام ١٩٧٩، وعلى العموم فإن طلبة دانتي لا يعرفون الكرات الثلاثية، أما اليوم، فأي عالم فيزياء وأي عالم رياضيات يمكن أن يلاحظ بسهولة الكرة الثلاثية في وصف دانتي للكون.

كيف من الممكن أن تراود دانتي مثل هذه الفكرة الحديثة؟ أعتقد أن ذلك كان ممكنًا في المقام الأول بسبب الذكاء الشديد الذي تمتع به شاعر إيطاليا الفذ، وهذا الذكاء أحد الأسباب التي جعلت «الكوميديا الإلهية» بهذه الروعة، ورغم ذلك فهناك سبب آخر يتمثل في أن دانتي كان يكتب منذ فترة طويلة سابقة على إقناع نيوتن للجميع بأن الفضاء الكوني اللانهائي هو ذلك الفضاء المسطح الذي تقول به الهندسة الإقليدية، لقد كان دانتي متحررًا من الأغلال التي تقيد حدسنا نتيجة لتعاليم نيوتن.

كانت ثقافة دانتي العلمية قائمة في الأساس على تعاليم مرشده ومعلمه «برونيتو لاتيني» الذي ترك لنا أطروحة صغيرة مذهلة اسمها «الكنوز» تعد موسوعة للمعارف في العصور الوسطى، مكتوبة بمزيج ممتع من الفرنسية والإيطالية القديمتين، وفي أطروحة «الكنوز» يشرح برونيتو بالتفصيل حقيقة أن الأرض دائرية، إلا أنه يفعل ذلك في ضوء الهندسة «الداخلية» بدلًا

* اعترض البعض قائلين: إن دانتي كان يتحدث عن «دوائر» لا عن «كرات»، وهذا الاعتراض غير سليم، يتحدث برونتو لاتيني عن «دائرة تشبه قشرة البيضة»، وكلمة «دائرة» بالنسبة لدانتي، وبالنسبة لمعلمه ومرشده تشير إلى كل شيء دائري بما فيه الكرات.

من الهندسة «الخارجية»، وهذا يبدو بالغ الغرابة في عين القارئ المعاصر، أي إنه لم يكتب «الأرض تشبه البرتقالة» مثلما قد تبدو الأرض إذا رأيناها من الخارج، بل كتب «إذا ركض فارسان لمسافة بعيدة كافية في اتجاهين متعاكسين فسوف يتقابلان على الجانب الآخر»، وكتب أيضًا: «إذا سار شخص للأبد، دون أن تعترض البحار طريقه، فسوف يعود لنفس النقطة على الأرض التي غادر منها»، وهذا يعني أنه تبنى منظورًا داخليًّا وليس منظورًا خارجيًّا؛ أي تبني منظور الشخص الذي يجوب الأرض لا منظور الشخص الذي ينظر إلى الأرض من بعيد، في الوهلة الأولى قد يبدو أن هذه طريقة عبثية ومعقدة لشرح كروية الأرض، فلماذا لم يقل برونيتو ببساطة: إن الأرض تشبه البرتقالة؟ أما إذا أمعنَّا النظر فسوف نجد أنه إذا سارت نملة على البرتقالة فسوف تجد نفسها في مرحلة ما مقلوبة رأسًا على عقب، ولا بد أن تظل متمسكة بالبرتقالة من خلال وسائد الالتصاق الصغيرة الموجودة على أرجلها تجنبًا للسقوط، والمسافر أيضًا الذي يجوب الأرض لن يجد نفسه مقلوبًا رأسًا على عقب، ولن يحتاج وسائد التصاق على رجليه، وعلى أيه حال فإن وف برونيتو ليس بالغ الغرابة.

لنفكر الآن في الأمر، بالنسبة لشخص تعلَّم من معلمه أن سطح الكوكب الذي نعيش عليه يسمح للسائر دائمًا في خط مستقيم أن يعود لنقطة البداية، فإنه ليس من الصعب أن يتوصل للنقطة البديهية التالية ويتخيل أن الكون بأكمله على هذا النحو، وأن الطيران دائمًا في خط مستقيم يقودنا إلى العودة إلى نفس نقطة المغادرة؛ حيث إن فضاء الكرة الثلاثية ما هو إلا فضاء «إذا «طار» فيه فارسان سريعان في اتجاهين معاكسين فإنهما سوف يتقابلان في الجانب الآخر»، وبلغة علمية، فإن الوصف الهندسي للأرض الذي قدمه برونيتو لاتيني في كتاب «الكنوز» مقدم من منظور الهندسة الداخلية (المرئية من الداخل) وليس من منظور الهندسة الخارجية (المرئية من الخارج)، وهذا هو فعلًا الوصف المناسب لتعميم فكرة «الكرة» من البعد الثنائي إلى البعد

الثلاثي، إن أفضل طريقة لوصف الكرة الثلاثية ليس «محاولة رؤيتها من الخارج»، بل وصف ما يحدث عند السير بداخلها.

إن الطريقة التي وضعها جاوس لوصف الأسطح المنحنية وعممها ريمان لوصف انحناء الفضاءات ثلاثية الأبعاد أو أكثر، تعود في الأساس إلى طريقة برونيتو لاتيني، فالفكرة تتمثل في وصف الفضاء المنحني ليس «كما نراه من الخارج» وذكر كيف ينحني في فضاء خارجي، بل وصف ما يجده الشخص «داخل» هذا الفضاء أثناء سيره ووجوده دائمًا داخله، فعلى سبيل المثال، سطح الكرة العادية كما يصفه برونيتو هو سطح تعود فيه كل الخطوط «المستقيمة» إلى نقطة البداية بعد قطع المسافة نفسها (طول خط الاستواء)، فالكرة الثلاثية عبارة عن سطح ثلاثي الأبعاد له الصفة نفسها.

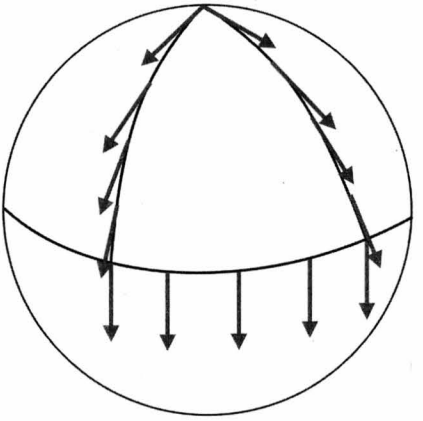
إن الزمكان عند أينشتاين ليس منحنيًا انحناءً في «فضاء خارجي»، بل معنى انحنائه أن هندسته «الداخلية» المتمثلة في شبكة المسافات بين نقاطه الممكن ملاحظتها بالبقاء داخله، ليست هندسة فضاء مسطح، إنه فضاء لا ينطبق عليه نظرية فيثاغورس مثلما لا تنطبق نظرية فيثاغورس على سطح الأرض.*

ثمة طريقة لفهم انحناء الفضاء من الداخل دون النظر إليه من الخارج، وهذا مهم لفهم ما يلي من أمور، تخيل أنك في القطب الشمالي وتسير متجهًا نحو الجنوب إلى أن تصل إلى خط الاستواء حاملًا سهمًا يشير إلى الأمام، بمجرد أن تصل إلى خط الاستواء التفت نحو اليسار دون تغيير اتجاه السهم، سيظل السهم يشير إلى الجنوب الذي أصبح الآن على يمينك، تقدم قليلًا نحو الشرق على طول خط الاستواء، ثم التفت مرة أخرى نحو الشمال ولا تغير اتجاه السهم أيضًا، فالسهم الآن سيكون يشير للخلف، عندما تصل

* على سبيل المثال، على سطح الأرض يمكن أن يكوّن القطب الشمالي ونقطتان على خط الاستواء مثلثًا متساوي الأضلاع وله ثلاث زوايا قائمة، وهذا الشيء من الواضح أنه لا يمكن فعله على سطح مستوي.

إلى القطب الشمالي مرة أخرى ستكون قد أكملت دورة مغلقة — «حلقة» كما يُطْلَق عليها — ولن يكون السهم مشيرًا إلى الاتجاه نفسه الذي بدأت به (انظر الشكل (٣ -١٤))، إن الزاوية التي التف من خلالها السهم على مدار الحلقة يقيس الانحناء.

سأعود لاحقًا لطريقة قياس الانحناء من خلال عمل حلقة في الفضاء، وستكون هذه هي الحلقات التي منحت الاسم لنظرية الجاذبية الكمية الحلقية.



الشكل (٣ - ١٤): السهم المحمول موازيًا لنفسه في دائرة (حلقة) في فضاء منحني يصل مقلوبًا عند نقطة المغادرة.

ترك دانتي فلورنسا عام ١٣٠١ عندما كانت فسيفساء قبة معمودية فلورنسا تحت الإنشاء، إن هذه الفسيفساء التي تمثل جدارية الجحيم (جدارية من تصميم كوبو دي ماركوفالدو معلم الرسام تشيمابو) والتي قد تبدو مروعة في نظر شخص من العصور الوسطى، لطالما اعتُبِرَت مصدر إلهام لدانتي (انظر الشكل (٣ -١٥))،

قبل الشروع في كتابة هذا الكتاب زرت معمودية فلورنسا برفقة

صديقتي إيمانويلا ميناي التي أقنعتني بتأليف هذا الكتاب، عند دخول المعمودية والنظر لأعلى سترى نقطة ضوء لامعة (مصدر الضوء مصباح في قمة القبة) يحيطها تسعة طغمات من الملائكة مع كتابة اسم كل طغمة من طغمات الملائكة على النحو التالي: الملائكة، رؤساء الملائكة، الرياسات، السيادات، السلاطين، القوات، العروش، الكاروبيم، السارافيم، وهذا يتوافق تمامًا مع بنية الكرة الثانية التي تمثل الفردوس، تخيل أنك نملة على أرضية المعمودية، وأنك تستطيع أن تسير في أي اتجاه؛ وأنك بصرف النظر عن الاتجاه الذي تسلكه لتسلق الجدار ستصل إلى السقف عند نقطة الضوء نفسها المحاطة بالملائكة؛ أي نقطة الضوء والملائكة «المحيطون» و«المحاطون» ببقية الأجزاء الداخلية المزخرفة في المعمودية (انظر الشكل (٣ -١٦)).

الشكل (٣ - ١٥): الفسيفساء التي تمثل الجحيم من تصميم كوبو دي ماركوفالدو في معمودية فلورنسا.

مثل أي مواطن في فلورنسا في نهاية القرن الثالث عشر، لا بد أن دانتي كان شديد الإعجاب بالمعمودية؛ حيث كانت مشروعًا معماريًّا مهيبًا تكمله مدينته، وأعتقد أنه ربما كانت المعمودية أيضًا مصدر إلهام له وليست جدارية «الجحيم» التي صممها كوبو دي ماركوفالدو فحسب، بل ألهمه التصميم المعماري للمعمودية ككل نظرًا لرؤيته للكون، وتقلد لوحة «الفردوس» بنية المعمودية بدقة مثيرة للدهشة، بما في ذلك دوائر الملائكة

التسع ونقطة الضوء، وتحولها فقط من الأبعاد الثنائية إلى الأبعاد الثلاثية، بعد وصف كون أرسطو الكروي، كتب برونيتو أن وراء ذلك الكون يوجد مقر الإله، وكانت أيقونات العصور الوسطى قد تخيلت بالفعل أن الفردوس في صورة الإله محاطًا بكرات الملائكة، في النهاية، لم يقم دانتي إلا بتجميع الأجزاء الموجودة بالفعل في كيان معماري متماسك يتبع الطراز المعماري للمعمودية الذي استوحى منه ويحل المشكلة القديمة المتمثلة في حدود الكون، وبهذه الطريقة سبق دانتي كرة أينشتاين الثلاثية بستة قرون.

الشكل (٣ - ١٦): داخل المعمودية.

لا أعلم إذا ما كان أينشتاين الشاب قد صاف أثناء جولاته الفكرية في إيطاليا لوحة «الفردوس»، وإذا ما كان الخيال الخصب للشاعر الإيطالي قد أثر تأثيرًا مباشرًا على إحساس أينشتاين بأن الكون ربما يكون محدودًا وبلا حدود أيضًا، وسواء أحدث هذا التأثر أم لم يحدث فإن هذا المثال يوضح كيف أن العلم الرائع والشعر الرائع كليهما يعتمد على الرؤية الحالمة، وأنهما من الممكن أن يصلا إلى التخمينات نفسها، من الحماقة أن تفصل ثقافتنا بين العلم والشعر، فكلاهما أدوات تفتح أعيننا على تعقيد وجمال العالم.

إن كرة دانتي الثلاثية ما هي إلا حدس داخل حلم، أما كرة أينشتاين

الثلاثية فلها شكل رياضي وصادرة عن معادلات النظرية، وتأثير كل منهما مختلف، إن دانتي يؤثر علينا بقوة ويلمس منابع مشاعرنا، أما أينشتاين فيفتح طريقًا نحو ألغاز الكون غير المحسومة، ورغم ذلك، فكلتاهما تُعَدَّان من أجمل وأهم الأفكار التي يمكن للعقل أن يحققها.

دعونا نعود إلى عام ١٩١٧ عندما حاول أينشتاين إدخال فكرة الكرة الثلاثية على معادلاته، لقد واجه مشكلة في هذه الجزئية، لقد كان مقتنعًا أن الكون ثابت وغير قابل للتغير، لكن معادلاته كانت تخبره أن هذا ليس ممكنًا، وليس من الصعب فهم سبب ذلك، إن كل الأشياء تتجاذب، ومن ثم فالطريقة الوحيدة لعدم انهيار الكون على نفسه هي التمدد، تمامًا مثلما أن الطريقة الوحيدة لمنع كرة القدم من السقوط على الأرض هو ركلها لأعلى، فالكرة إما أن تصعد لأعلى أو تسقط لأسفل، فلا يمكن أن تظل ثابتة معلقة في الهواء.

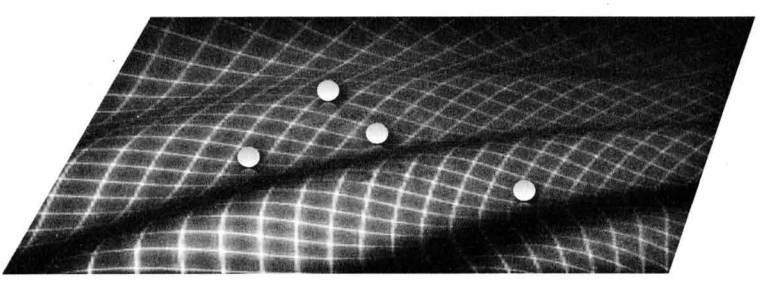
إلا أن أينشتاين لم يصدق ما تخبره إياه المعادلات، بل ارتكب خطأً فيزيائيًّا سخيفًا لمجرد تجنب قبول توقع النظرية المتمثل في احتمالية تقلص الكون أو تمدده (فلم يكن أينشتاين مدركًا أن الحل الذي يفكر فيه لا يمكن أن يظل ثابتًا)، عدَّل أينشتاين المعادلات محاولًا تجنب احتمالية تمدد الكون؛ ولهذا السبب أضاف المصطلح Λg_{ab} في المعادلة المذكورة سابقًا، إلا أن هذه المعادلة هي خطأ آخر؛ لأن المصطلح المضاف صحيح لكنه لا يغير الحقيقة التي تتنبأ بها المعادلة والمتمثلة في حتمية تمدد الكون، وعلى الرغم من جرأة أينشتاين، فإن هذا العبقري افتقر إلى شجاعة تصديق معادلاته.

وبعد سنوات قليلة اضطر أينشتاين للاستسلام، فقد اتضح أن نظريته هي الصحيحة وليس تحفظاته على النظرية، لقد أدرك الفلكيون أن كل المجرات تتحرك بالفعل بعيدًا عنا، فالكون يتمدد تمامًا مثلما توقعت معادلات أينشتاين، فقبل أربعة عشر مليون سنة كان الكون متقلصًا لما يشبه نقطة واحدة شديدة السخونة، ومن هنا تمدد في انفجار «كوني» رهيب، وهنا

مصطلح «كوني» ليس مستخدمًا استخدامًا مجازيًّا، بل استخدامًا حرفيًّا، لقد كان انفجارًا كونيًّا، فهذا هو الانفجار العظيم المسمى «البيج بانج».

اليوم نعرف أن الانفجار حقيقي، والدليل القاطع على السيناريو الذي توقعته معادلات أينشتاين توصل إليه عام ١٩٦٤ أمريكيان من علماء الفلك الإشعاعي هما: أرنو بنزياس وروبرت ويلسون، عندما اكتشفا صدفة إشعاعًا منتشرًا في الكون اتضح أنه بالضبط عبارة عن بقايا الحرارة الهائلة الأصلية المنبعثة من الكون القديم، ومرة أخرى، اتضح أن النظرية كانت صحيحة حتى في أكثر توقعاتها إدهاشًا.

منذ أن اكتشفنا أن الأرض كروية وأنها تدور بسرعة جنونية مثل النحلة الدوارة، فهمنا أن الواقع ليس كما يبدو؛ فكل مرة نرى جانبًا جديدًا منه تكون لنا بمثابة تجربة عاطفية شديدة الأثر، لقد انكشف حجاب جديد، إلا أن القفزة التي حققها أينشتاين غير مسبوقة؛ فالزمكان عبارة عن مجال، فالكون مكون فقط من مجالات وجسيمات، والمكان والزمان ليسا شيئًا مختلفًا، فهما لا يختلفان عن بقية الطبيعة، فهما مجرد مجال وسط المجالات الأخرى (انظر الشكل (٣ -١٧)).



الشكل (٣ - ١٧): عالم أينشتاين: جسيمات ومجالات تتحرك على مجالات أخرى.

عام ١٩٥٣، كتب طفل في الصفوف الابتدائية خطابًا إلى أينشتاين قال فيه: «ندرس الكون في الصف، وأنا مهتم بالمكان، وأود أن أشكرك على كل ما فعلته لكي نتمكن من فهمه.»[٥]

وأنا أشعر بالشعور نفسه.

الفصل الرابع

الكموم

يوجد اختلاف كبير بين عمودَي فيزياء القرن العشرين المتمثلين في النسبية العامة وميكانيكا الكم، فالنسبية العامة عبارة عن جوهرة مركبة فهمها عقل واحد، وهي قائمة على تجميع النظريات السابقة، فهي رؤية بسيطة ومترابطة للجاذبية والمكان والزمان، أما ميكانيكا الكم أو النظرية الكمية، فقد نشأت من تجارب على مدار فترة تكوين طويلة امتدت لربع قرن، وساهم فيها الكثير من العلماء، وحققت نجاحًا تجريبيًّا لا يُضَاهى، وأدت إلى تطبيقات غيرت حياتنا اليومية (فعلى سبيل المثال، جهاز الكمبيوتر الذي أكتب عليه من إحدى تطبيقاتها)؛ إلا أنها ظلت لأكثر من قرن بعد ميلادها محتجبة في الغموض وعدم القدرة على فهمها.

يوضح هذا الفصل الفيزياء الغريبة لهذه النظرية، ويسرد كيف تكونت النظرية وجوانب الواقع الثلاثة التي كشفتها والمتمثلة في الحُبَيْبِيَّة واللاتحديد والعلائقية.

ألبرت مرة أخرى

يقال: إن ميكانيكا الكم وُلِدَت بالضبط في عام ١٩٠٠، وبدأت فعليًّا قرنًا من الفكر العميق، ففي عام ١٩٠٠ حاول عالم الفيزياء الألماني ماكس بلانك حساب كمية موجات كهرومغناطيسية في حالة اتزان كيميائي منبعثة من صندوق ساخن، وللحصول على الصيغة التي تمثل نتائج التجربة

لجأ في النهاية إلى حيلة بَدَتْ غير منطقية؛ فقد افترض أن طاقة المجال الكهربي موزَّعة في صورة «كمات»، أي حزم صغيرة أو وحدات صغيرة من الطاقة، وافترض أن حجم الحزم يعتمد على التردد (أي لون) الموجات الكهرومغناطيسية؛ لأن الموجات ذات التردد v أو كل كمة أو كل حزمة لها طاقة.

$$E = hv$$

هذه المعادلة أولى معادلات ميكانيكا الكم، حيث h ثابت مبتكر نطلق عليه اليوم ثابت بلانك، فهو يحدد قدر الطاقة الموجودة في كل حزمة طاقة، للإشعاع الذي له تردد (لون) v، ويحدد الثابت h مستوى كل الظواهر الكمومية.

كانت فكرة احتمالية كون الطاقة مكونة من حزم محددة متناقضة مع كل ما كان معروفًا في ذلك الوقت؛ حيث كانت تعتبر الطاقة شيئًا من الممكن أن يختلف باستمرار، ولم يكن من المنطقي التعامل معها كما لو كانت مكونة من حبيبات، على سبيل المثال، تقيس طاقة البندول سعة التأرجح، ولا يبدو أن هناك سببًا لتذبذب البندول بسعات محددة معينة دون سعات أخرى، أما بالنسبة لماكس بلانك، فقد كان التعامل مع الطاقة على أنها حزم محددة الحجم ليس إلا حيلة غريبة بَدَتْ مناسبة لحساباته — أي لمحاكاة القياسات المعملية — لكن لأسباب غير واضحة تمامًا.

وبعد خمس سنوات كان أينشتاين — مرة أخرى — هو مَنْ فهم أن حزم طاقة بلانك حقيقية فعليًا، وهذا هو موضوع ثالث مقالة من المقالات الثلاثة التي أرسلها إلى صحيفة «أنالين دير فيزيك» عام ١٩٠٥، وهذا هو تاريخ الميلاد الحقيقي لنظرية الكم.

وفي هذه المقالة، قال أينشتاين: إن الضوء مكون حقًّا من حبيبات صغيرة هي جسيمات الضوء، وتناول ظاهرة لوحظت مؤخرًا ألا وهي التأثير الكهروضوئي، توجد مواد تولد تيارًا كهربيًّا ضعيفًا عندما يسقط

عليها الضوء، أي إنها تُصْدِر إليكترونات عندما يسطع الضوء عليها، واليوم نستخدمها على سبيل المثال في الخلايا الكهروضوئية التي تفتح الأبواب عندما نقترب منها من خلال اكتشاف إذا ما كان الضوء يصل إلى المستشعر أم لا، إن حدوث ذلك الأمر ليس بغريب، فالضوء يحمل الطاقة (فهو يدفئنا على سبيل المثال)، وطاقته تجعل الإليكترونات «تقفز» من ذراتها؛ فهي تمنحها دفعة.

ورغم ذلك، فثمة أمر غريب؛ إذ بَدَا منطقيًّا توقعه أنه في حالة كون طاقة الضوء قليلة — أي إذا كان الضوء خافتًا — يكون من غير الممكن حدوث الظاهرة؛ وأنها ستحدث عندما تكون الطاقة كافية، أي عندما يكون الضوء ساطعًا، إلا أن الأمر لم يكن كذلك، فقد لوحظ أن الظاهرة تحدث فقط إذا كان «تردد» الضوء عاليًا ولا تحدث إذا كان «التردد» منخفضًا، وهذا يعني أن حدوثها من عدمه يعتمد على لون الضوء (التردد) وليس على «شدته» (أي طاقته)، ولا سبيل لفهم ذلك بالاستعانة بالفيزياء التقليدية.

استخدم أينشتاين فكرة بلانك المتمثلة في حزم الطاقة ذات الحجم المعتمد على التردد، وأدرك أنه إذا كانت هذه الحزم حقيقية فسيكون من الممكن تفسير الظاهرة، وليس من الصعب فهم السبب، فإذا تخيلنا أن الضوء يصل في شكل حبيبات طاقة؛ فإن الإليكترون سوف ينجرف بعيدًا عن ذراته إذا كانت الحُبَيبة المصطدمة به تحمل قدرًا هائلًا من الطاقة، فالمهم هو طاقة «كل» حُبَيبة وليس «عدد» الحبيبات، وبحسب فرضية بلانك، فإذا كانت طاقة كل حُبَيبة يحددها التردد، فلن تحدث الظاهرة إلا إذا كان التردد عاليًا بالقدر الكافي، أي إذا كانت حُبيبات الطاقة «المنفردة» كبيرة بما يكفي بعيدًا عن كمية الطاقة الكلية المحيطة بها.

الأمر يشبه ما يحدث عند هطول البرد، فالذي يتحكم في إذا ما كانت سيارتك ستنبعج ليس الكمية الكلية للبرد الساقط بل حجم كل حبة من حبات البرد، فمن الممكن أن يكون هطول حبات البرد شديدًا دون أن

تتضرر سيارتك إذا كانت حبات البرد صغيرة، وبالمثل، فإذا كان الضوء شديدًا — مما يؤدي إلى القول بوجود قدر هائل من الحزم الضوئية — فالإليكترونات لن تخرج من الذرات إذا كان حُبَيبات الضوء شديدة الصغر؛ أي إذا كان تردد الضوء شديد الانخفاض، وهذا يفسر لماذا اللون وليس الشدة هو ما يحدد حدوث التأثير الكهروضوئي من عدمه، وبسبب هذا الاستنتاج البسيط حصل أينشتاين على جائزة نوبل، فمن السهل فهم الأمور بعد أن يتفكر فيها مليًّا شخص آخر، فالصعوبة تكمن في التفكير فيها مليًّا في بادئ الأمر.

اليوم نطلق على حزم الطاقة «فوتونات»، وهي مشتقة من كلمة يونانية تعني الضوء، والفوتونات هي حُبيبات الضوء، فهي «كمات» الضوء، وقد كتب أينشتاين في مقالته:

> يبدو لي أن الملاحظات المرتبطة بإشعاع الجسم الأسود والفلورية وإنتاج أشعة الكاثود من خلال الضوء فوق البنفسجي، وغيرها من الظواهر المرتبطة بإشعاع الضوء أو تحويله سيكون من الأسهل فهمها إذا افترضنا أن طاقة الضوء موزَّعة في الفضاء على نحو متقطع، ووفقًا للافتراض الذي نتناوله هنا، فإن طاقة شعاع الضوء المنبعث من مصدر نقطي ليست موزعة باستمرار على فضاء متزايد، بل تتكون من عدد محدد من «كمات الطاقة» الموجودة في نقاط في الفضاء، وتتحرك دون انقسام، ولا يمكن إنتاجها وامتصاصها إلا في صورة وحدات كاملة.[١]

هذه السطور البسيطة والواضحة هي شهادة الميلاد الحقيقية لنظرية الكم، لاحظوا الجملة الافتتاحية الرائعة التي تقول: «يبدو لي ...» التي تذكرنا بتردد فاراداي أو نيوتن أو تشكك داروين في الصفحات الأولى من كتابه «أصل الأنواع»، فالعبقري الحقيقي يدرك دائمًا خطورة الخطوات التي يأخذها ودائمًا ما يكون مترددًا ...

توجد علاقة واضحة بين عمل أينشتاين على الحركة البراونية (التي ناقشناها في الفصل الأول) وبين عمله على كمات الضوء، وكلا الموضوعين أكملهما في عام ١٩٠٥، في العمل الأول، تمكن أينشتاين من العثور على دليل على الفرضية الذرية، أي البنية الحُبَيْبِيَّة للمادة، وفي العمل الثاني طبَّق الفرضية نفسها على الضوء، فقال: إن الضوء لا بد أن يكون مكونًا من بنية حُبَيْبِيَّة أيضًا.

في البداية، اعتبر زملاء أينشتاين فكرته عن تكون الضوء من فوتونات مجرد طيش شباب، لقد امتدحه الجميع على نظرية النسبية، لكن الجميع اعتبر فكرة الفوتونات فكرة غريبة، فلقد كان العلماء قد اقتنعوا مؤخرًا أن الضوء عبارة عن موجة في المجال الكهرومغناطيسي، فكيف من الممكن أن يكون مكونًا من حبيبيات؟ في خطاب موجه إلى الوزارة الألمانية يرشح أينشتاين لمنصب أستاذ في برلين، كتب أكثر العلماء تميزًا في ذلك الوقت أن هذا الشاب بارع للغاية لدرجة «إمكانية التماس الأعذار» له في شطحات معينة مثل فكرة الفوتونات، ولم تمر سنوات كثيرة حتى كافأه الزملاء أنفسهم بجائزة نوبل وتحديدًا لأنه أدرك وجود الفوتونات، فالضوء يسقط على السطح مثل وابل رقيق من البرد.

ولفهم كيف يمكن أن يكون الضوء موجة كهرومغناطيسية ومجموعة فوتونات في الوقت نفسه سيتطلب الأمر تكوين كامل لفيزياء الكم، إلا أن أول حجر أساس في هذه النظرية كان قد وُضِعَ بالفعل، حيث يوجد حُبَيْبِيَّة أساسية في «كل» الأشياء، بما فيها الضوء.

نيلز وفيرنر وبول

إذا كان بلانك هو الأب الطبيعي للنظرية، فإن أينشتاين هو الوالد الذي ولدها ورعاها، لكن كما هو الحال غالبًا مع الأبناء، فقد سارت النظرية في طريقها، ونادرًا ما اعترف أينشتاين بأنها ملكه.

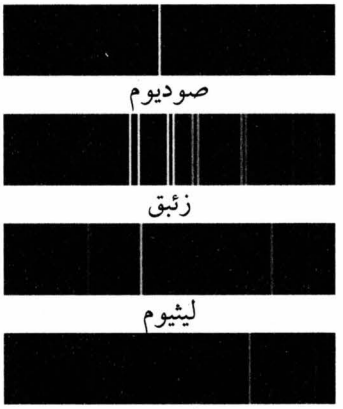
الشكل (٤ - ١): نيلز بور.

أثناء أول عقدين من القرن العشرين، كان دين نيلز بور هو المسئول عن توجيه تطور النظرية، درس بور بنية الذرات التي بدأ استكشافها في مطلع القرن، وقد أظهرت التجارب أن الذرة تشبه مجموعة شمسية صغيرة؛ فالكتلة مركَّزة في نواة مركزية ثقيلة وحولها تدور إليكترونات خفيفة، على نحو يشابه تقريبًا الكواكب التي تدور حول الشمس، ورغم ذلك، فإن هذه الصورة لم تفسر حقيقة بسيطة تتمثل في تلون المادة.

الملح أبيض، والفلفل أسود، والفلفل الحار أحمر، فما السبب؟ عند دراسة الضوء المنبعث من الذران يتضح أن المواد لها ألوان محددة، ونظرًا لأن اللون عبارة عن تردد الضوء، فإن الضوء ينبعث من المواد بترددات ثابتة معينة، وتعرف مجموعة الترددات المميزة لمادة معينة باسم «طيف» المادة، والطيف هو مجموعة خطوط رفيعة ذات صبغات لونية مختلفة يتحلل فيها الضوء المنبعث من مادة معينة (من خلال منشور على سبيل المثال)، ويوضح الشكل (٤ -٢) أطيافًا لبعض العناصر.

في مطلع القرن دُرِسَت أطياف العديد من المواد وصُنِّفَت في الكثير من المختبرات، ولم يعرف أحد كيف يفسر سبب امتلاك كل مادة لطيف معين، فما الذي يحدد لون تلك الخطوط؟

اللون هو سرعة اهتزاز خطوط فاراداي، ويحددها اهتزازات الشحنات الكهربية التي تصدر الضوء، وهذه الشحنات هي الإليكترونات التي تتحرك داخل الذرات، ومن ثم، فمن خلال دراسة الأطياف يمكننا أن نفهم كيف تتحرك الإليكترونات حول الأنوية، وبالعكس، فمن الممكن توقُّع طيف كل ذرة من خلال حساب ترددات الإليكترونات التي تدور حول نواتها،



الشكل (٤ - ٢): أطياف بعض العناصر وهي كالتالي: الصوديوم والزئبق والليثيوم والهيدروجين.

من السهل قول ذلك، لكن من الناحية العملية لا أحد يستطيع فعل ذلك، في الحقيقة، بدا الأمر كله مستحيلًا؛ لأنه وفقًا لميكانيكا نيوتن يستطيع الإليكترون الدوران حول النواة «بأية» سرعة، ومن ثم يصدر ضوءًا «بأي» تردد، ورغم ذلك، فلماذا لا يحتوي الضوء الصادر عن الذرة على «كل» الألوان بدلًا من بعض ألوان محددة فحسب؟ لماذا الأطياف الذرية ليست متسلسلة من الألوان بدلًا من كونها مجرد خطوط منفصلة؟ لماذا هي «منفصلة» كما يطلق عليها تقنيًا وليست متسلسلة؟ على مدار عقود ظل علماء الفيزياء عاجزين عن التوصل للإجابة.

وجد بور حلًّا مبدئيًا عن طريقة افتراضًا غريبًا، لقد أدرك أن كل شيء يمكن تفسيره فقط إذا كان لطاقة الإليكترونات الموجودة في الذرات قيم «مكممة» معينة، أي قيم محددة معينة مثلما افترض بلانك وأينشتاين لطاقة كمات الضوء، مرة أخرى، كانت «الحُبَيْبِيَّة» هي الحل، لكن ليس لطاقة الضوء بل لطاقة الإليكترونات الموجودة في الذرة، لقد بدأ يتضح أن الحُبَيْبِيَّة أمر منتشر في الطبيعة.

افترض بور أن الإليكترونات يمكن أن توجد على بُعْد مسافات «خاصة» معينة من النواة؛ أي إنها توجد فقط في مدارات خاصة معينة يحدد مستواها ثابت بلانك h، وافترض أن الإليكترونات يمكن أن «تقفز» من مدار إلى آخر بالطاقة المسموحة، وهذه هي «القفزات الكمية» الشهيرة، ويحدد تردد تحرك الإليكترون على هذه المدارات تردد الضوء المنبعث، ونظرًا لأن

المدارات المسموحة محددة، فلا ينبعث إلا ترددات معينة فحسب.

تحدد هذه الافتراضات «النموذج الذري» لبور الذي احتفل بذكراه المئوية عام ٢٠١٣، ومن خلال هذه الافتراضات (الغريبة والبسيطة) تمكَّن بور من حساب أطياف كل الذرات، وكذلك توقع الأطياف غير الملحوظة بعدُ توقعًا دقيقًا، وكان النجاح التجريبي لهذا النموذج البسيط مدهشًا.

ومن الواضح أنه لا بد من وجود بعض الحقائق في هذه الافتراضات حتى وإن كانت معارضة لكل الأفكار المعاصرة عن المادة والديناميكا، لكن لماذا يوجد دائمًا مدارات معينة فحسب؟ وما المقصود بأن الإليكترونات «تقفز»؟

في معهد بور في كوبنهاجن حاولت أعظم العقول النابهة في هذا القرن ترتيب فوضى السلوكيات غير المفهومة في العالم الذري، وتكوين نظرية متماسكة، كان البحث مضنيًا ومطولًا إلى أن توصل شاب ألماني إلى السبيل إلى حل لغز عالم الكم.

كان فيرنر هايزنبيرج في الخامسة والعشرين من عمره عندما كتب معادلات ميكانيكا الكم، أي في العمر نفسه الذي كتب فيه أينشتاين مقالاته الثلاثة البارزة، وفعل ذلك على أساس أفكار مذهلة.

الشكل (٤ - ٣): فيرنر هايزنبيرج.

جاء له الحدس ذات ليلة في الحديقة الموجودة خلف معهد كوبنهاجن للفيزياء، كان الشاب فيرنر يتجول متفكرًا في الحديقة، وكانت الحديقة مظلمة فعلًا، وكنا في عام ١٩٢٥، ولم يكن يوجد في الشوارع إلا مصابيح متفرقة تُسْقِط بقعًا من الضوء الخافت هنا وهناك، ويفصل بين بقع الضوء مساحات شاسعة من الظلام،

وفجأة رأى هايزنبيرج شخصًا يمر بجانبه، في الواقع لم ير هذا الشخص وهو يمر، بل رأى الشخص يظهر أسفل المصباح ثم يختفي الظلام قبل أن يعاود الظهور تحت مصباح آخر، ثم يختفي في الظلام مرة أخرى، وهكذا من بقعة ضوء لبقعة ضوء حتى اختفى في النهاية تمامًا في جنح الليل، ورأى هايزنبيرج أنه «من الواضح» أن الرجل لا يختفي فعليًا ويعاود الظهور، واستطاع هايزنبيرج بسهولة أن يعيد في مخيلته رسم مسار الرجل بين كل مصباح وآخر من مصابيح الشارع، فعلى العموم الرجل كيان ضخم وكبير وثقيل، والأشياء الكبيرة والثقيلة لا تظهر ببساطة وتختفي ...

آه! «هذه» الأشياء الضخمة والكبيرة والثقيلة لا تختفي وتعاود الظهور ... لكن ما الذي نعرفه عن الإليكترونات؟ ثم خطرت على باله فكرة، فتساءل لماذا يمكن أن تفعل أشياء صغيرة مثل الإليكترونات الأمر نفسه؟ ماذا لو كانت الإليكترونات حقًّا «قادرة» على الاختفاء ومعاودة الظهور؟ ماذا لو كانت هذه هي القفزات الكمية الغامضة التي يبدو أنها أساس بنية الأطياف الذرية؟ ماذا لو كانت الإليكترونات بين كل تفاعل مع شيء وتفاعل مع شيء آخر تكون حرفيًا «ليست في أي مكان».

ماذا لو كان الإليكترون شيئًا لا يظهر إلا عند التفاعل وعند التصادم مع شيء آخر؛ وبين كل تفاعل وآخر لا يكون له موقع محدد؟ ماذا لو كان الحصول على موقع محدد لا يحدث إلا إذا كان الشيء ضخمًا على نحو كافٍ، أي كبير وثقيل مثل الرجل الذي مر منذ برهة مثل الشبح في الظلام ثم اختفى في جنح الليل ...؟

لن يتعامل بجدية مع هذه الأفكار المجنونة إلا شاب في العشرينات من عمره، لا بد أن تكون في العشرينيات من عمرك لتصدِّق أن هذه الأفكار يمكن أن تتحول إلى نظرية عن الكون، وربما يجب أن تكون شابًّا لتفهم أفضل من أي شخص آخر بنية الطبيعة العميقة، ولأول مرة، ومثلما كان أينشتاين في العشرينيات من عمره عندما أدرك أن الزمن لا يمر على الجميع

بالطريقة نفسها، كان هايزنبيرج في العمر نفسه في تلك الليلة في كوبنهاجن، وربما ليس من الصائب أن تثق في حدسك بعد سن الثلاثين ...

عاد هايزنبيرج إلى منزله وقد تملَّكه الحماس وعكف على الحسابات، خرج بعد فترة بنظرية مربكة تمثل وصفًا أساسيًّا لحركة الجسيمات، ولم يكتف في هذه النظرية بوصف مواقع الجسيمات في كل لحظة بل وصف مواقعها أيضًا في لحظات معينة، وهي تلك اللحظات التي تتفاعل فيها مع شيء آخر.

هذا هو حجر الأساس الثاني في ميكانيكا الكم وأصعب مفاتيحها، وهو الجانب «العلائقي» للأشياء، فالإليكترونات لا توجد دائمًا، فهي توجد عندما تتفاعل، إنها تظهر في مكان ما عندما تصطدم بشيء آخر، إن القفزات الكمية من مدار إلى آخر تمثل طريقة تحولها إلى حقيقة؛ فالإليكترون عبارة عن مجموعة قفزات من تفاعل إلى آخر، وإذا لم يزعج الإليكترون شيء فإنه لا يوجد في أي مكان، وبدلًا من كتابة مكان الإليكترون وسرعته، كتب هايزنبيرج جداول أرقام (مصفوفات)، وضرب وقسم جداول أرقام تمثل التفاعلات المحتملة للإليكترونات، وتوافقت النتائج بالضبط مع ما لوحظ، كما لو كانت قد جاءت من عداد سحري، وهذه هي أولى المعادلات الأساسية لميكانيكا الكم، ومن هنا فصاعدًا سوف تستمر هذه المعادلات في النجاح ولا شيء غير النجاح، وحتى الآن لم تفشل هذه المعادلات مطلقًا رغم أن ذلك قد يبدو أمرًا لا يُصَدَّق.

وفي النهاية، أخذ شاب آخر في الخامسة والعشرين من عمره العمل الذي بدأه هايزنبيرج، وتولى نظريته الجديدة وأسس دعامتها الرسمية والرياضية بالكامل، ويعتبر كثيرون الإنجليزي بول أدريان موريس ديراك أعظم فيزيائي في القرن العشرين بعد أينشتاين.

على الرغم من مكانة ديراك العملية فإنه أقل شهرةً من أينشتاين، وهذا يرجع من ناحية إلى التجريد العلمي الذي لا يفهمه إلا القليل، وإلى شخصيته

الشكل (٤ - ٤): بول ديراك.

المربكة من ناحية أخرى، ونظرًا لأنه يظل صامتًا برفقة الآخرين وشديد التحفظ، وغير قادر على التعبير عن مشاعره، وغير قادر في أغلب الأحيان على التعرف على وجوه معارفه — بل غير قادر على إجراء أي محادثة عادية، أو فهم الأسئلة البسيطة على ما يبدو — فقد بدا كما لو كان مصابًا بالتوحد، وربما كان مصابًا بالتوحد بالفعل.

وخلال إحدى محاضراته، قال له أحد الزملاء: «أنا لا أفهم هذه الصيغة»، ورغم ذلك، أكمل ديراك المحاضرة بعد فترة صمت قصيرة، فقاطعه مدير المحاضرة وسأله إذا ما كان سيجيب عن السؤال، فأجابه ديراك بدهشة صادقة: «سؤال؟ أي سؤال؟ لقد أقر الزميل بحقيقة»، ومن منظور المعنى الحرفي الضيق، فقد أعرب زميله عن حقيقة فعلًا، لم يكن هذا غرور من ديراك، فالرجل الذي استطاع كشف أسرار الطبيعة التي حيرت الجميع لم يستطع فهم المعنى الضمني للكلام، ولم يستطع فهمه الاستخدام اللغوي غير الحرفي، وكان يأخذ كل جملة على معناها الظاهري،[٢] ورغم ذلك، فعلى يديه تحولت ميكانيكا الكم من مجموعة أفكار حدسية وحسابات غير مدروسة جيدًا ومناقشات ومعادلات ميتافيزيقية غامضة تعمل جيدًا على نحو لا يمكن تفسيره، إلى بنية مثالية تأملية وبسيطة وشديدة الجمال، وعلى الرغم من جمالها، فإنها شديدة التجريد.

وعنه قال العالم الجليل بور: «ديراك هو الأنقى قلبًا بين علماء الفيزياء»، ألا تدل عيناه على ذلك في الشكل (٤ -٤)؟ إن فيزياء ديراك تشبه الأغنية في وضوحها الصافي، بالنسبة إلى ديراك، فإن الكون ليس مصنوعًا من أشياء، بل مكون من بنية رياضية مجردة توضح لنا كيف تبدو الأشياء وكيف تتصرف عندما تكشف عن نفسها، إنه لقاء سحري بين المنطق والحدس،

وقد قال عنه أينشتاين من فرط إعجابه به: «إن ديراك يثير مشاكل كثيرة بالنسبة لي، إن الحفاظ على التوازن في هذا المسار المربك المتأرجح بين العبقرية والجنون لمحاولة مرهقة.»

إن نظرية ميكانيكا الكم التي وضعها ديراك هي النظرية الرياضية التي يستخدمها اليوم أي مهندس أو كيميائي أو عالم في الأحياء الجزيئية، وفيها يتحدد كل شيء من خلال فضاء مجرد* ولا يتمتع فيها بأي صفة في حد ذاته باستثناء الصفات الثابتة مثل الكتلة، أما الموقع والسرعة والزخم الزاوي والجهد الكهربي وغيرها من الصفات فلا تصبح حقيقية إلا عندما يصطدم — «يتفاعل» — مع شيء آخر، وليس الموقع فقط هو غير المحدد، فقد قال هايزنبيرج: إنه لا يتحدد «أي» متغير من متغيرات الشيء بين كل تفاعل والتفاعل الذي يليه، ومن ثم فالجانب «العلائقي» للنظرية يصبح عامًّا.

وفي أثناء التفاعل مع شيء آخر، عندما يظهر فجأة المتغير المادي (السرعة، الطاقة، الزخم، الزخم الزاوي) فإنه لا يتخذ أي قيمة وحسب، بل يوضح ديراك وصفة عامة لحساب مجموعة القيم التي يمكن أن يتخذها المتغير المادي،** وهذه القيم تشبه أطياف الضوء المنبعثة من الذرات، واليوم نطلق على مجموعة القيم المعينة التي يمكن أن يتخذها المتغير «طيف» المتغير، مقارنةً بالأطياف التي يتحلل إليها ضوء العناصر، وهذا أول مظاهر هذه الظاهرة، على سبيل المثال، من الممكن أن يكتسب نصف قطر مدارات الإليكترون المحيط بالنواة قيم محددة فحسب، وهي القيم التي افترضها بور، وهي التي تكون «طيف نصف القطر».

بالإضافة إلى ذلك، تقدم النظرية معلومات حول قيمة الطيف «المعينة» التي سوف تظهر في التفاعل التالي، لكن في صورة احتمالات،

---

* فضاء هيلبرت

** هذه هي القيم المميزة للمؤثر المرتبط بالمتغير المادي المذكور، والمعادلة الرئيسية هي معادلة القيمة المميزة.

فنحن لا نعلم على وجه التأكيد أين سيظهر الإليكترون، لكن يمكننا حساب «احتمالية» ظهوره هنا أو هناك، وهذا هو التغيير الجذري عن نظرية نيوتن، حيث من الممكن أن نتوقع المستقبل على نحو مؤكد من الناحية النظرية، تجعل ميكانيكا الكم الاحتمالية أساس تطور الأشياء، و«اللاتحديد» هو حجر الأساس الثالث في ميكانيكا الكم؛ ويقصد به اكتشاف أن الصدفة تعمل على المستوى الذري، فبينما كانت فيزياء نيوتن تسمح بتوقع المستقبل بدقة إذا توافر لدينا معلومات كافية عن البيانات الأولية وإذا استطعنا إجراء الحسابات، فإن ميكانيكا الكم تسمح لنا فقط بحساب «احتمالية» الحدث، وغياب التحديد على مستوى صغير سمة متأصلة في الطبيعة، فالإليكترون ليس مجبرًا بطبعه على التحرك نحو اليمين أو اليسار؛ لكنه يفعل ذلك بمحض الصدفة، أما الحتمية الواضحة في العالم العياني فراجعة فحسب إلى أن العشوائية العيانية تبطل في المتوسط، تاركةً فقط تقلبات أصغر من أن نلاحظها في حياتنا اليومية.

ومن ثم تتيح لنا ميكانيكا الكم التي وضعها ديراك فعل أمرين: أولهما حساب «القيم» التي قد يتخذها المتغير المادي، ويطلق عليها «حساب طيف المتغير»، وهذا يبين الطبيعة «الحُبَيْبِيَّة» للأشياء، عندما يتفاعل شيء (ذرة، مجال كهرومغناطيسي، جزيء، بندول، حجر، نجم، وغيره) مع شيء آخر، فإن القيم المحسوبة هي تلك التي يمكن أن تتخذها متغيراتها في التفاعل («العلائقية»)، الأمر الثاني الذي تمكننا ميكانيكا كم ديراك من فعله هو حساب «احتمالية» ظهور هذه القيمة أو تلك في التفاعل التالي، ويُطلق عليها «حساب سعة الانتقال»، وتمثل الاحتمالية السمة الثالثة من سمات النظرية ألا وهي «اللاتحديد»، والمقصود أنها لا تعطي توقعات فريدة بل مجرد توقعات احتمالية.

هذه ميكانيكا كم ديراك؛ إنها وصفة لحساب طيف المتغيرات، ووصفة لحساب احتمالية ظهور قيمة معينة في الطيف أثناء التفاعل، هذه هي النظرية،

أما ما يحدث بين كل تفاعل والتفاعل الذي يليه فليس مذكور في النظرية، إنه غير موجود.

يمكن تخيل احتمالية العثور على إليكترون أو أي جسيم آخر عند نقطة أو أخرى كسحابة منتشرة تزداد كثافتها عندما تكون احتمالية رؤية الجسيم أقوى، وأحيانًا يكون من المفيد تخيل هذه السحابة كما لو كانت شيئًا حقيقيًا، فمثلًا السحابة التي تمثل الإليكترون حول نواته توضح أين تزداد احتمالية ظهور الإليكترون إذا نظرنا إليها، ربما صادفتها في المدرسة، فهي ما يطلق عليه «المدارات الذرية».*

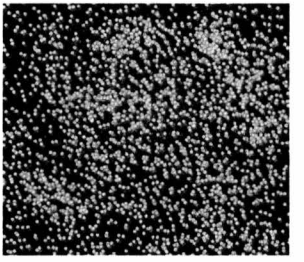
وسرعان ما أثبتت النظرية كفاءتها الفائقة، فإذا كنا نصنع اليوم أجهزة الكمبيوتر، وطورنا الكيمياء الجزيئية والأحياء والليزر وأشباه الموصلات،

* يصف هذه السحابة كائن رياضي يسمى الدالة الموجية، وكتب الفيزيائي النرويجي إرفين شرودنجر معادلة تصف تطورها عبر الزمن، غالبًا ما يُعتقد على نحو خاطئ أن ميكانيكا الكم هي هذه المعادلة، لقد عقد شرودنجر آمالًا على إمكانية استخدام «الموجة» في تفسير غرائب نظرية الكم؛ فالأمواج أمر مفهوم تمامًا بالنسبة لنا بدايةً من أمواج البحر وحتى الأمواج الكهرومغناطيسية وحتى يومنا الحاضر، ما زال بعض علماء الفيزياء يحاولون فهم ميكانيكا الكم من خلال اعتقاد أن الواقع هو موجة شرودنجر، إلا أن هايزنبيرج وديراك فَهِمَا على الفور أن هذا غير ممكن، إن اعتبار موجة شرودنجر أمر حقيقي يعني منحها حجمًا أكبر من حجمها، وهذا لا يفيدنا في فهم النظرية، بل على العكس يقودنا إلى مزيد من التشوش، وباستثناء حالات خاصة، فإن موجة شرودنجر ليست في الفضاء المادي، وهذا يجردها من كل ما يتعلق بطابعها الحدسي، أما السبب الرئيسي في كون موجة شرودنجر صورة سيئة للواقع فهو أنه عند اصطدام جسيم بشيء آخر فإنه يكون دائمًا في نقطة معينة ولا ينتشر أبدًا في الفضاء مثل الموجة، إذا اعتبرنا الإليكترون موجة فسوف نجد صعوبة في تفسير لماذا تتركز على الفور هذه الموجة في نقطة في كل تصادم، إن موجة شرودنجر ليست مثالًا مفيدًا للواقع، إنما هي وسيلة للحساب تسمح لنا بتوقع المكان الذي سيعاود فيه الإليكترون الظهور بقدر من الدقة، إن حقيقة الإليكترون ليست موجة، بل هي طريقة ظهوره في التفاعلات، مثل الرجل الذي ظهر في بقع ضوء المصباح عندما كان يسير هايزنبيرج الشاب متأملًا في إحدى الليالي في كوبنهاجن.

فالفضل يعود إلى ميكانيكا الكم، وعلى مدار عقود معينة بَدَا كما لو كان كل يوم هو يوم عيد بالنسبة لعلماء الفيزياء؛ لأنه كان يوجد لكل مشكلة حل نابع من معادلات ميكانيكا الكم، ودائمًا ما كان يكون الحل صحيح، ومثال واحد على ذلك سيكون كافيًا.

تتكون المادة المحيطة بنا من آلاف المواد المختلفة، وخلال القرنين التاسع عشر والعشرين كان الكيميائيون يعتقدون أن هذه المواد المختلفة عبارة عن تركيبات من عدد صغير نسبيًّا (أقل من مائة) من هذه العناصر البسيطة: الهيدروجين، الهيليوم، الأكسجين، وهكذا حتى اليورانيوم ورتب مندليف هذه العناصر (وفقًا للوزن) في الجدول الدوري الشهير المعلق في كثير من الفصول، والذي يلخص صفات العناصر التي يتكون منها العالم، ليس فقط على الأرض لكن في كل أنحاء الكون في كل المجرات، فلماذا هذه العناصر المحددة؟ ما الذي يفسر البنية الدورية للجدول؟ لماذا لكل عنصر صفات معينة دون صفات أخرى؟ لماذا على سبيل المثال تندمج بعض العناصر بسهولة، ولا تندمج الأخرى بالسهولة نفسها؟ ما هو سر البنية الغريبة لجدول مندليف؟

حسنًا، تأمل معادلة ميكانيكا الكم التي تحدد شكل مدارات الإليكترون، لهذه المعادلة عدد معين من الحلول، وهذه الحلول تتوافق بالضبط مع الهيدروجين والهيليوم والأكسجين ... وغيرها من العناصر! إن جدول مندليف مصمم ليشبه بالضبط هذه الحلول، إن صفات العناصر، وكل شيء آخر يتبع حل هذه المعادلة، إن ميكانيكا الكم تكشف بالضبط سر بنية جدول العناصر الدوري.



الشكل (٤ - ٥): الضوء موجة في مجال، لكنه يمتلك أيضًا بنية حُبَيْبِيَّة.

لقد تحقق حلم فيثاغورس وأفلاطون القديم المتمثل في وصف كل مواد العالم في

صيغة واحدة، لقد تجمَّع تعقيد الكيمياء اللانهائي في حلول معادلة واحدة! وهذا فقط مجرد أحد تطبيقات ميكانيكا الكم.

المجالات والجسيمات شيء واحد

بعد وقت قصير من إكمال الصياغة العامة لميكانيكا الكم، أدرك ديراك أن النظرية يمكن تطبيقها مباشرةً على مجالات مثل المجالات الكهرومغناطيسية، ويمكن جعلها متوافقة مع النسبية الخاصة، (أما جعلها متوافقة مع النسبية «العامة» فسيتضح أنه أكثر صعوبة، وهذا هو الموضوع الأساسي لهذا الكتاب)، وأثناء القيام بذلك اكتشف ديراك تبسيطًا خفيًّا وعميقًا لوصفنا للطبيعة، ألا وهو التقاء فكرة الجسيمات التي استخدمها نيوتن وفكرة المجالات التي قدمها فاراداي.

إن سحابة الاحتمالية التي تصاحب الإليكترونات بين كل تفاعل وآخر تشبه المجال، وتتكون مجالات فاراداي وماكسويل بدورها من حبيبات؛ أي فوتونات، إن الجسيمات منتشرة في الفضاء على نحو يشبه نسبيًّا انتشار المجالات، والمجالات أيضًا تتفاعل مثل الجسيمات، إن فكرة المجالات وفكرة الجسيمات التي فصل بينهما فاراداي وماكسويل اندمجتا في النهاية في ميكانيكا الكم.

أما طريقة حدوث ذلك في النظرية فبسيطة؛ فمعادلة ديراك تحدد القيم التي يمكن أن يأخذها المتغير، وعند تطبيقها على «طاقة» خطوط فاراداي، فإنها تخبرنا بأن هذه الطاقة يمكن أن تتخذ قيمًا معينة فحسب دون قيم أخرى، ونظرًا لأن طاقة المجال الكهرومغناطيسي يمكن أن تأخذ قيمًا معينة فحسب، فإن المجال يتصرف مثل مجموعة من حزم الطاقة، وهذه بالضبط هي كمات الطاقة التي قدمها بلانك وأينشتاين قبل ثلاثين عامًا، وهكذا أُقْفِلَت الدائرة وتمت القصة، فمعادلات النظرية التي كتبها ديراك تفسر طبيعة الضوء الحُبَيْبِيَّة التي خمنها بلانك وأينشتاين.

الموجات الكهرومغناطيسية هي اهتزازات خطوط فاراداي، لكنها أيضًا مجموعات من الفوتونات على نطاق أصغر، وعندما تتفاعل مع شيء آخر — كما هو الحال في الظاهرة الكهروضوئية — فإنها تظهر في صورة جسيمات: ففي أعيننا ينهمر الضوء في صورة قطرات صغيرة متفرقة؛ أي في صورة فوتونات منفردة، والفوتونات هي كمات المجال الكهرومغناطيسي.

ورغم ذلك، فإن الإليكترونات وكل الجسيمات الأخرى التي يتكون منها العالم كلها على حد سواء كمات مجال، «مجال كمي» يشبه مجال فاراداي ومجال ماكسويل، ويخضع للحُبَيْبِيَّة والاحتمالية الكمية، لقد كتب ديراك معادلات مجال الإليكترونات وغيرها من الجسيمات الأولية،* لقد اختفى الفرق الشاسع بين المجالات والجسيمات الذي قدمه فاراداي.

ومن ثم فإن الصورة العامة للنظرية الكمية المتوافقة مع النسبية الخاصة يطلق عليها نظرية المجال الكمي، وتشكل أساس فيزياء الجسيمات المعاصرة، الجسيمات هي كمات المجال تمامًا مثلما تمثل الفوتونات كمات الضوء، فكل المجالات تظهر بنيتها الحُبَيْبِيَّة في تفاعلاتها.

على مدار القرن العشرين تحدثت على نحو متكرر قائمة المجالات الأساسية، واليوم لدينا نظرية يُطْلَق عليها «النموذج المعياري» للجسيمات الأولية تصف تقريبًا كل ما نراه، باستثناء الجاذبية،** في سياق نظرية المجال الكمي، شَغَلَ تطوير هذا النموذج علماء الفيزياء لفترة طويلة خلال القرن الماضي، ويمثل هذا النموذج في حد ذاته مغامرة اكتشاف رائعة، لا أعرض هذا الجانب من القصة هنا، فالجاذبية الكمية هي ما أود التطرق إليه، اكتمل النموذج المعياري في سبعينيات القرن العشرين، ويوجد ما يقرب

* معادلة ديراك.

** توجد ظاهرة يبدو أنه لا يمكن اختزالها في صورة النموذج المعياري ألا وهي: «المادة المظلمة»، يلاحظ علماء الفلك وعلماء الكون تأثيرات المادة في الكون التي يبدو أنها ليست من النوع الذي يصفه النموذج المعياري، فما زال هناك الكثير من الأمور التي لا نعرفها.

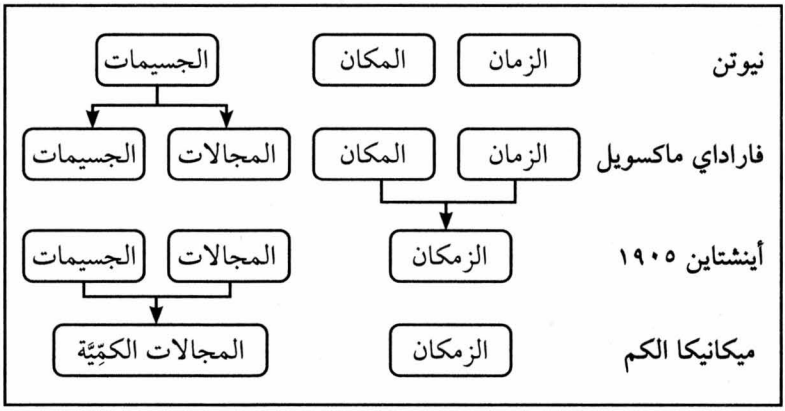
من خمسة عشر مجالًا تمثل كماتها الجسيمات الأولية (الإليكترونات، الكواركات، الميوونات، النيوترينوات، بوزونات هيجز، وغيرها القليل)، بالإضافة إلى بعض مجالات تشبه المجال الكهرومغناطيسي تصف القوة الكهرومغناطيسية وغيرها من القوى التي تعمل على المستوى النووي التي تشبه كماتها الفوتونات.

لم يؤخذ النموذج المعياري على محمل الجد في البداية بسبب طبيعته التي تبدو ترقيعية نسبيًّا المختلفة جدًّا عن البساطة الشديدة التي تميز النسبية العامة ومعادلات ماكسويل أو معادلات ديراك، وعلى النقيض مما هو متوقع، فقد تأكدت كل ما تنبأ به النموذج، وعلى مدار ما يزيد عن ثلاثين سنة، لم تسفر أي تجربة لفيزياء الجسيمات إلا عن إعادة تأكيد صحة النموذج المعياري على نحو متكرر، وآخر هذه التأكيدات كان اكتشاف جسيم بوزون هيجز الذي أحدث ضجة عام ٢٠١٣، بدا مجال هيجز الذي قدمه ليجعل النظرية متماسكة مصطنعًا بعض الشيء إلا أنه لوحظ فعليًّا بوزون هيجز الذي يمثل كم هذا المجال، ووجد أنه يمتلك بالضبط الصفات التي توقعها النموذج المعياري.* (أما مسألة تسميته «جسيم الرب» فهو أمر مفرط في الغباء لا يستحق التعليق عليه.) باختصار، على الرغم من تواضع الاسم المجحف، فإن النموذج المعياري كان انتصارًا.

اليوم تقدم ميكانيكا الكم بمجالاتها أو جسيماتها وصفًا للطبيعة فعالًا على نحو مدهش، فالعالم لا يتكون من مجالات وجسيمات، بل من نوع واحد من الكيانات ألا وهو المجال الكمي، فلم يعد هناك جسيمات تتحرك

* وجدت أن زعم أن بوزون هيجز «يفسر الكتلة» نوع من المبالغة، إن بوزون هيجز لا «يفسر» أي شيء متعلق بأصل الكتلة، فما الذي «يفسر» كتلة هيجز؟ المسألة تقنية، فالنموذج المعياري يعتمد على تناظرات معينة، وهذه التناظرات يبدو أنها تسمح فقط بالجسيمات الخالية من الكتلة، إلا أن هيجز وغيره أدركوا أنه من الممكن أن يوجد تناظرات وكتلة أيضًا، طالما أن الأخيرة تدخل بطريقة غير مباشرة عبر التفاعل مع المجال المعروف حاليًا باسم مجال هيجز.

في الفضاء مع مرور الزمن، بل أصبح هناك مجالات كمِّيَّة تحدث أحداثها الأولية في الزمكان، إن العالم غريب، لكنه بسيط (انظر الشكل (٤ -٦)).



الشكل (٤ - ٦): مم يتكون العالم؟

الكمَّات ١: المعلومات محدودة

حان الوقت للتوصل لبعض الاستنتاجات حول ما تخبرنا به بالضبط ميكانيكا الكم عن العالم، وهذه المهمة ليست بسهلة؛ لأن ميكانيكا الكم ليست واضحة من الناحية المفاهيمية ومعناها الحقيقي مثير للجدل، لكن هذه المحاولة ضرورية لاكتساب الوضوح والمضي قدمًا، أعتقد أن ميكانيكا الكم قد كشفت ثلاث سمات عن طبيعة الأشياء ألا وهي: الحُبَيْبِيَّة، واللاتحديد، والبنية العلائقية للعالم، لنُلْقِ نظرة عن كثب على كل سمة من هذه السمات.

أول هذه السمات هو «الحُبَيْبِيَّة» الأساسية في الطبيعة، إن حُبَيْبِيَّة المادة والضوء هي أساس النظرية الكمِّيَّة، ورغم ذلك، فهي ليست الحُبَيْبِيَّة نفسها التي خمنها ديموقريطوس، فالذرات بالنسبة لديموقريطوس كانت تشبه الحصى، بينما في ميكانيكا الكم تختفي الجسيمات وتعاود الظهور، ورغم

ذلك، فأساس فكرة الحُبَيْبِيَّة الجوهرية ما زال موجودًا في المدرسة الذرية القديمة، أما ميكانيكا الكم التي تعززت على مدار قرون من التجربة بفضل علوم الرياضيات القوية وقدرتها الرائعة على التوصل للتنبؤات الصحيحة، فتعد اعترافًا حقيقيًّا بالرؤى العميقة المتعلقة بطبيعة الأشياء التي توصل لها فيلسوف أبديرة العظيم.

لنفترض أننا نحسب قياسات نظام فيزيائي ووجدنا أن النظام في حالة معينة، فعلى سبيل المثال، عند قياس سعة اهتزازات البندول وجدنا أن له قيمة محددة، مثلًا ما بين خمس سنتيمترات وست سنتيمترات (فلا يوجد قياس دقيق في الفيزياء)، قبل ميكانيكا الكم كنا سنقول: إنه نظرًا لوجود عدد لا نهائي من القيم المحتملة بين الخمسة والستة سنتيمترات (مثلًا ٥,١ أو ٥,١٠١ أو ٥,١٠١٠٠١ ...)، فإنه يوجد حالات حركة محتملة «لا نهائية» قد يجد البندول نفسه فيها؛ ومن ثم فقدر جهلنا بحالة البندول ما زال غير محدود.

أما ميكانيكا الكم فتخبرنا أن ما بين خمسة وستة سنتيمترات يوجد عدد «محدود» من القيم المحتملة لسعة الاهتزاز، ومن ثم فمعلوماتنا الناقصة عن البندول «محدودة».

وهذا ينطبق على كل شيء في العموم،* ومن ثم، فالمعنى الأول لميكانيكا الكم هو وجود حد «للمعلومات» التي يمكن أن توجد داخل أحد الأنظمة؛ أي حد لعدد الحالات القابلة للتميز التي يمكن أن يكون عليها النظام، وتحديد اللانهائية — التي يقصد بها السمة الحُبَيْبِيَّة للطبيعة التي

* إن منطقة محددة من فضاء الطور — فضاء الحالات المحتملة في النظام — تحتوي على عدد «لا نهائي» من الحالات الكلاسيكية القابلة للتمييز، لكن تحتوي «دائمًا» على عدد «محدد» فقط من الحالات الكمية المتعامدة، ونحصل على هذا العدد من خلال حجم المنطقة مقسومًا على ثابت بلانك، مرفوعًا إلى عدد درجات الحرية، وهذه النتيجة عامة.

أدركها ديموقريطوس — هو السمة المحورية الأولى للنظرية، وثابت بلانك h يقيس المستوى الأولي من هذه الحُبَيْبِيَّة.

الكمَّات ٢: اللاتحديد

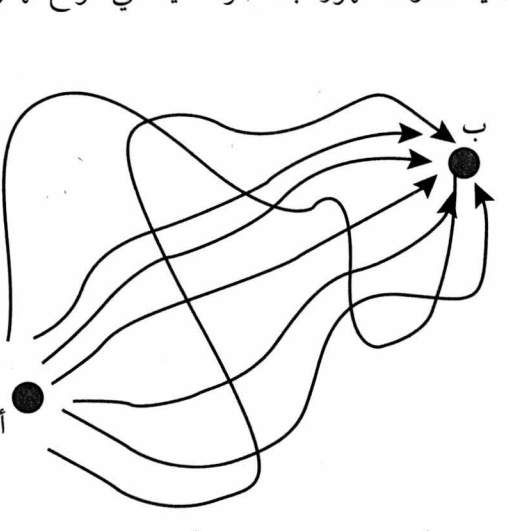
العالم سلسلة من الأحداث الكمِّيَّة الحُبَيْبِيَّة، وهي منفصلة وحُبَيْبِيَّة ومستقلة؛ إنها تفاعلات مستقلة لنظام فيزيائي مع نظام آخر، فالإليكترون أو كمة المجال أو الفوتون لا يتبع مسارًا في الفضاء، بل يظهر في مكان معين وفي وقت معين عند الاصطدام بشيء آخر، فمتى وأين سيظهر؟ لا يوجد طريقة لمعرفة ذلك بالتأكيد، تقدم ميكانيكا الكم «لا تحديد» أساسي لجوهر العالم، فلا يمكن التنبؤ حقًّا بالمستقبل، وهذا هو الدرس الثاني الأساسي المكتسب من ميكانيكا الكم.

ونظرًا لسمة اللاتحديد الموجودة في العالم التي تخبرنا بها ميكانيكا الكم، فإن الأشياء خاضعة باستمرار للتغير العشوائي، فكل المتغيرات «تتذبذب» باستمرار، كما لو كان كل شيء يهتز باستمرار على أصغر نطاق، ولا نرى هذه الاهتزازات المنتشرة إلا بسبب نطاقها الصغير؛ فمن غير الممكن أن نراها على نطاق كبير مثلما نرى الأجسام العيانية، فإذا نظرنا إلى الحجر فسنراه ساكنًا، أما إذا نظرنا إلى ذراته، فسوف نلاحظ أنها تنتشر باستمرار هنا وهناك، وأنها في حالة اهتزاز لا يتوقف، تكشف لنا ميكانيكا الكم أننا كلما أمعنَّا النظر في تفاصيل العالم؛ وجدنا أنه أقل ثباتًا، فالعالم ليس مكونًا من حصى صغيرة، إن العالم عبارة عن اهتزازات وتأرجح مستمر وانتشار مجهري لأحداث صغيرة زائلة.

لقد توقعت المدرسة الذرية القديمة سمة أخرى من سمات الفيزياء المعاصرة ألا وهي ظهور قوانين الاحتمالية على مستوى عميق، لقد افترض ديموقريطوس (مثل نيوتن) أن حركة الذرات يحددها بصرامة اصطداماتها، أما خليفته إبيقور فصحح حتمية معلمه وقدَّم للمدرسة

الذرية فكرة اللاتحديد بالطريقة نفسها التي قدَّم بها هايزنبيرج اللاتحديد إلى حتمية نيوتن، رأي إبيقور أن الذرات أحيانًا يمكن أن تنحرف صدفةً عن مسارها، يعبر لوكريتيوس عن ذلك بكلماته الجميلة، فيقول: إن هذا الانحراف يحدث «في مكان غير محدد في زمان غير محدد».[٣] العشوائية نفسها وظهور الاحتمالية على المستوى الأولي هو ثاني اكتشاف أساسي عن العالم توضحه ميكانيكا الكم.

إذا كان لدينا إليكترون في موقع مبدئي معين هو (أ)، فكيف يمكننا حساب احتمالية معاودة ظهوره بعد فترة معينة في موقع نهائي أو آخر هو (ب)؟



الشكل (٤ - ٧): من أجل التحرك من النقطة أ إلى النقطة ب يتصرف الإليكترون كما لو كان يمر عبر كل المسارات المحتملة.

في خمسينيات القرن العشرين وجد ريتشارد فاينمان — الذي ذكرته سالفًا — طريقة توضيحية لإجراء هذا الحساب على النحو التالي: تأمل «كل» المسارات المحتملة من (أ) إلى (ب)، أي كل المسارات المحتملة التي يمكن أن يسلكها الإليكترون (مستقيمة، منحنية، متعرجة، ...)، وكل مسار من هذه المسارات يحدد عددًا، ونحصل على الاحتمالية من مجموع

كل هذه الأعداد، وتفاصيل هذا الحساب ليست مهمة، فالمهم هو مساهمة كل المسارات من (أ) إلى (ب)، فالأمر كما لو كان الإليكترون مر «عبر كل المسارات المحتملة» من أجل الوصول من (أ) إلى (ب)، أو أنه تمدد في صورة سحابة من أجل أن يقترب على نحو غامض من النقطة (ب) ليصطدم مرة أخرى بشيء آخر (انظر الشكل (٤ -٧)).

يُطْلَق على هذا الأسلوب المتبع لحساب احتمالية الحدث الكمِّي مجموع تكامل المسارات لفاينمان،* وسنرى أنه لعب دورًا في الجاذبية الكمِّيَّة.

الكمَّات ٣: الواقع علائقي

ثالث اكتشاف عن العالم أوضحته ميكانيكا الكم هو الأعمق والأصعب، والذي لم تتوقعه المدرسة الذرية القديمة.

لا تصف النظرية الأشياء كما «هي»، بل تصف كيف «تحدث» الأشياء وكيف «تتفاعل مع بعضها البعض»، إنها لا تصف أين يوجد الجسيم بل كيف «يظهر الجسيم نفسه للجسيمات الأخرى»، لقد اختزل عالم الأشياء الموجودة إلى نطاق من التفاعلات المحتملة، لقد اختزل الواقع إلى تفاعل، لقد اختزل الواقع إلى علاقة.[٤]

من ناحية معينة نجد أن هذا مجرد امتداد للنسبية لكنه امتداد جذري، لقد كان أرسطو أول من أكد أننا ندرك فقط سرعة «نسبية»، فعلى سبيل المثال، على متن السفينة نتحدث عن سرعتنا بالنسبة إلى السفينة؛ وعلى البر نتحدث عن سرعتنا بالنسبة إلى الأرض، وأدرك جاليليو أن لهذا السبب تستطيع الأرض الدوران حول الشمس دون أن نشعر بهذه الحركة، فالسرعة

* أو تكامل مسارات فاينمان، احتمالية الانتقال من أ إلى ب هي الوحدة المربعة للتكامل على كل مسارات الدالة الأسية للحركة التقليدية للمسار، مضروبة في الوحدة المتخيلة ومقسومة على ثابت بلانك.

ليست صفة شيء في حد ذاته، بل هي صفة حركة الشيء «بالنسبة لشيء آخر»، وطبق أينشتاين فكرة النسبية على الزمن، فقال: إننا يمكن أن نقول على حدثين: إنهما متزامنان بالنسبة إلى حركة معينة فقط (انظر الحاشية السفلية الثانية في الفصل الثالث)، وطبقت ميكانيكا الكم هذه النسبية بطريقة جذرية؛ فقالت: إن «كل» السمات المتغيرة في الشيء موجودة فقط بالنسبة إلى أشياء أخرى، في التفاعلات فقط ترسم الطبيعة العالم.

في العالم الذي تصفه ميكانيكا الكم لا يوجد واقع إلا في «العلاقات» بين الأنظمة الفيزيائية، وليست الأشياء هي ما يدخل العلاقات، بل العلاقات هي ما ترسي فكرة «الشيء»، إن عالم ميكانيكا الكم ليس عالم أشياء، بل عالم أحداث، فالأشياء تتكون من خلال حدوث أحداث أساسية؛ وكما قال الفيلسوف نيلسون جودمان في خمسينيات القرن العشرين في جملة جميلة: «الشيء عملية رتيبة»، فالحجر اهتزاز كمات تحافظ على بنيتها لفترة، مثلما تحافظ موجة البحر على هويتها لفترة قبل أن تذوب مرة أخرى في البحر.

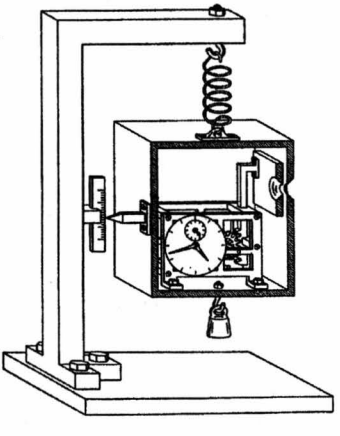
ما هي الموجة التي تتحرك على الماء دون أن تحمل معها أي قطرة ماء؟ الموجة ليست شيئًا، حيث إنها ليست مصنوعة من مادة تسافر معها، والذرات الموجودة في أجسامنا أيضًا تتدفق داخلنا وبعيدًا عنا، ونحن مثل الأمواج ومثل بقية الأشياء عبارة عن فيض من الأحداث؛ إننا عمليات مملة لفترة وجيزة ...

ميكانيكا الكم لا تصف الأشياء؛ بل تصف العمليات والأحداث التي هي عبارة عن نقط وصل بين العمليات.

وتلخيصًا، فإن ميكانيكا الكم هي اكتشاف ثلاث سمات عن العالم هي:

- «الحُبَيْبِيَّة» (انظر الشكل (٤ -٨)): فالمعلومات في حالة أحد الأنظمة تكون نهائية ومحددة بثابت بلانك.

- «اللاتحديد»: فالمستقبل لا يحدده الماضي على نحو قاطع، وحتى الأمور المنتظمة على نحو شديد الصرامة التي نراها إنما هي إحصائية في النهاية.
- «العلائقية»: أحداث الطبيعة دائمًا ما تكون تفاعلات، فكل أحداث أحد الأنظمة تحدث وفقًا لعلاقة بنظام آخر.



الشكل (٤ - ٨): «صندوق الضوء» في تجربة أينشتاين الذهنية كما رسمه بور.

تعلمنا ميكانيكا الكم ألا نفكر في العالم من حيث «الأشياء» الموجودة في حالة أو في أخرى، بل أن نفكر فيه من حيث «العمليات»، فالعملية عبارة عن ممر من تفاعل إلى آخر، ولا تظهر صفات «الأشياء» بشكل «حبيبي» إلا لحظة التفاعل، أي بالقرب من العمليات، وتكون كذلك فقط «من حيث علاقتها» بالأشياء الأخرى، ولا يمكن توقعها على نحو قاطع، بل يمكن توقعها على نحو «محتمل» فحسب.

لقد غاص بور وهايزنبيرج وديراك في أعماق طبيعة الأشياء على نحو قَلَبَ الموازين.

هل نفهم حقًّا؟

من المؤكد أن ميكانيكا الكم انتصار للدقة، ورغم ذلك، هل أنت متأكد أيها القارئ من أنك تفهم تمامًا ما تكشفه لنا ميكانيكا الكم؟ فالإليكترون لا يوجد في أي مكان عندما يكون في حالة عدم تفاعل ... والأشياء توجد فقط عندما تقفز من تفاعل إلى آخر ... حسنًا ... هل تبدو كل هذه الأمور عبثية بعض الشيء؟

تبدو هذه الأمور عبثية بالنسبة لأينشتاين.

من ناحية، رشح أينشتاين فيرنر هايزنبيرج وبول ديراك لجائزة نوبل إدراكًا منه أنهما فَهِما شيئًا أساسيًّا عن العالم، ومن ناحية أخرى، انتهز كل فرصة للتذمر من ذلك. على كل حال لا شيء من هذا يبدو منطقيًّا.

أصاب الإحباط أسدَي مجموعة كوبنهاجن، فكيف يأتي هذا الموقف من «أينشتاين» نفسه؟ إن الأب الروحي والرجل الذي كان لديه شجاعة التفكير في الأمور التي لا يمكن التفكير فيها قد تراجع الآن وخشي هذه القفزة الجديدة إلى المجهول؛ تلك القفزة التي أثارها بنفسه، كيف يمكن أن يكون أينشتاين الذي علمنا أن الزمن ليس عامًّا وأن الفضاء ينحني، هو نفسه الشخص الذي يقول الآن: إن العالم لا يمكن أن يكون «بهذه» الغرابة؟

تحلى نيلز بور بالصبر وشرح لأينشتاين الأفكار الجديدة، وكان أينشتاين يقابله بالاعتراض، ودائمًا ما كان يتمكن بور في النهاية من العثور على إجابات لاعتراضات أينشتاين، واستمر هذا الحوار لسنوات من خلال المحاضرات والخطابات والمقالات ... وابتكر أينشتاين تجارب ذهنية لتوضيح أن الأفكار الجديدة متعارضة، فقال: «تخيل صندوقًا مليئًا بالضوء، يسمح بهروب فوتون من هذا الضوء للحظة وجيزة ...»: وعلى هذا النحو بدأت واحدة من أشهر أمثلة هذه التجارب الذهنية (انظر الشكل (٤ -٨)).*

* تفتح آلية في الصندوق نافذة صغيرة على اليمين للحظة، مما يسمح بهروب فوتون =

وأثناء هذا الجدل اضطر كلا الرجلين إلى الإذعان وتغيير أفكارهما، فاضطر أينشتاين إلى الاعتراف بعدم وجود تعارض داخل الأفكار، وكان لزامًا على بور إدراك أن الأشياء ليست بالبساطة والوضوح اللذين تخيلهما، ولم يرغب أينشتاين في التنازل عن الفكرة التي كانت أساسية بالنسبة له، والتي تمثلت في وجود حقيقة موضوعية مستقلة عن تفاعلات الأشياء مع بعضها البعض، أما بور فلم يرغب في التنازل عن صحة الطريقة الجديدة تمامًا لتصور الواقع من خلال النظرية، وفي النهاية، قَبِلَ أينشتاين أن النظرية تمثل قفزة كبيرة للأمام في فهمنا للعالم وأنها متماسكة، إلا أنه ظل مقتنعًا بأن الأمور لا يمكن أن تكون بهذه الغرابة التي تطرحها النظرية، وأن «وراءها» لا بد أنه يوجد تفسير آخر أكثر عقلانية.

مر قرن ولا زلنا عند النقطة نفسها، كتب ريتشارد فاينمان أكثر شخص عرف كيف يتلاعب بالنظرية: «أعتقد أنني يمكنني القول أن لا أحد يفهم حقًّا ميكانيكا الكم.»

تُستَخدم معادلات النظرية ونتائجها يوميًّا في مجالات كثيرة متنوعة؛ حيث يستخدمها الفيزيائيون والمهندسون والكيميائيون وعلماء الأحياء، ورغم ذلك، فإنها ما زالت غامضة؛ فهي لا تصف أنظمة فيزيائية بل كيف تتفاعل هذه الأنظمة الفيزيائية وتؤثر في بعضها البعض، فما معنى هذا؟

ما زال الفيزيائيون والفلاسفة يتساءلون عن المعنى الحقيقي المحتمل

= في لحظة محددة، ومن خلال وزن الصندوق من الممكن استنتاج طاقة الفوتون الذي انطلق، وأمل أينشتاين في أن يتسبب ذلك في خلق صعوبات لميكانيكا الكم التي توقعت أن الزمن والطاقة لا يمكن تحديدهما بدقة، فأجاب بور على نحو خاطئ أن السبيل للخروج من هذه الصعوبة يتطلب نظرية النسبية العامة التي وضعها أينشتاين، وقَبِلَ أينشتاين جواب بور وكان مخطئًا في قبوله، والجواب الصحيح الذي عجز بور عن تقديمه لأينشتاين لكنه أصبح واضحًا اليوم هو أن موقع الفوتون الهارب ووزن الصندوق يظلان مرتبطين بأحدهما الآخر (مترابطين) حتى إذا أصبح الفوتون شديد البعد.

للنظرية، وفي السنوات الأخيرة انتشرت المقالات والمؤتمرات التي تتناول هذا الموضوع.

ما هي النظرية الكمية بعد قرن من ميلادها؟ هل هي غوص عميق مدهش في طبيعة الواقع؟ أم خطأ ناجح بالصدفة؟ أم جزء من لغز غير مكتمل؟ أم دليل على شيء عميق متعلق ببنية العالم لم نتمكن من فك لغزه بالكامل بعدُ؟

إن تفسير ميكانيكا الكم المقدَّم في هذا الكتاب هو التفسير الذي بَدَا لي الأقل غير منطقي، ويطلق عليه «التفسير العلائقي»، وناقشه فلاسفة جادُّون أمثال: باس فان فراسن وميشيل بيتبول وماورو دوراتو.[٥] ورغم ذلك، فلا يوجد إجماع على طريقة التفكير في ميكانيكا الكم؛ فهناك طرق أخرى للتفكير فيها ناقشها علماء فيزياء آخرون وفلاسفة آخرون، نحن على شفا ما لا نعرفه والآراء متباينة.

ميكانيكا الكم ليست سوى نظرية فيزيائية، وربما سيصححها غدًا فهم للعالم مختلف بل وأكثر عمقًا، ويحاول بعض العلماء المعاصرين حلها نوعًا ما لجعلها أكثر توافقًا مع الحدس، وفي رأيي، فإن نجاحها التجريبي الهائل يجب أن يجبرنا على التعامل معها بجدية، وأن نكفَّ عن التساؤل عن التغيير المطلوب في النظرية، وأن نتساءل بدلًا من ذلك عن الأمر القاصر في حدسنا الذي يجعل النظرية تبدو لنا بهذه الغرابة.

أعتقد أن غموض النظرية ليس ذنب ميكانيكا الكم بل بسبب قدرتنا المحدودة على التخيل، فعندما نحاول «رؤية» العالم الكمي نكون أشبه بحيوانات الخلد التي تعيش تحت الأرض عندما يحاول شخص أن يصف لها جبال الهملايا، أو ربما نشبه الأشخاص المحبوسين خلف كهف أفلاطون.

عندما مات أينشتاين قال عنه بور أعظم منافسيه كلمات إعجاب مؤثرة، وبعد سنوات قليلة عندما مات بور، صوَّر أحد الأشخاص صورة

فوتوغرافية للسبورة الموجودة في غرفة مكتبه، وكان على السبورة مخطط يمثل «صندوق الضوء» الذي يخص تجربة أينشتاين الذهنية، لقد استمرت إلى النهاية الرغبة في الجدل والرغبة في فهم المزيد، لقد استمر الشك إلى النهاية.

إن هذا الشك الدائم، هو المصدر العميق للعلم.

الجزء الثالث
الفضاء الكمي والزمن العلائقي

إذا كنت قد تبعتني حتى هذه النقطة، فأنت لديك الآن كل العناصر اللازمة لفهم الصورة الحالية للعالم التي توضحها الفيزياء الأساسية: نقاط قوتها، نقاط ضعفها، حدودها.

يوجد زمكان منحني خُلِقَ منذ ١٤ مليار سنة — ولا أحد يعرف كيف حدث — وما زال يتمدد، وهذا الفضاء شيء حقيقي، فهو مجال فيزيائي وصفت معادلات أينشتاين حركيته، فالفضاء ينحني ويتقوس تحت تأثير وزن المادة، ويندفع إلى الثقوب السوداء عندما تكون المادة شديدة التركيز.

المادة موزعة في ١٠٠ مليار مجرة، وتحتوي كل مجرة على ١٠٠ مليار نجم، ومكونة من مجالات كمية تظهر في صورة جسيمات مثل الإليكترونات والفوتونات، أو في صورة موجات مثل الموجات الكهرومغناطيسية التي تمنحنا الصور التليفزيونية وضوء الشمس والنجوم.

تكون هذه المجالات الكمية الذرات والضوء وبقية مكونات الكون، وهي أشياء غريبة، فكمات عبارة عن جسيمات تظهر عند تفاعلها مع شيء آخر؛ وإذ تُرِكَت وحدها فإنها تتمدد في صورة «سحابة احتمالية»، فالعالم عبارة عن تجمُّع للأحداث الأولية عائم في بحر فضاء شاسع مستمر في الحركة يتموج مثل الماء في المحيط.

بهذه الصورة عن العالم، وبهذه المعادلات القليلة التي تجعله ماديًّا، يمكننا أن نصف كل ما نراه تقريبًا.

تقريبًا، ثمة شيء ناقص، وهذا الشيء الناقص هو ما نبحث عنه، وبقية الكتاب تتحدث عن هذا الجزء الناقص.

عندما تقلب الصفحة سوف تنتقل مما تعرف عن العالم بحلوه ومره على نحو قابل للتصديق، إلى ما لم نعرفه بعدُ ونحاول أن نأخذ لمحة عنه.

إن قلب الصفحة أشبه بمغادرة أمان المركبة الفضائية الصغيرة للأمور التي نعتبرها شبه مؤكدة والدخول إلى المجهول.

الفصل الخامس
الزمكان كمي

ثمة تناقض في فهمنا للعالم المادي، إن الجوهرتين اللتين تركهما القرن العشرين المتمثلتين في النسبية العامة وميكانيكا الكم، قدمتا لنا هدايا غزيرة فيما يتعلق بفهم العالم وبالتكنولوجيا المعاصرة، فمن النسبية العامة تطور علم الكونيات بالإضافة إلى الفيزياء الفلكية التي تُعْنَى بدراسة موجات الجاذبية والثقوب السوداء، أما ميكانيكا الكم فقد قدمت أساس الفيزياء الذرية والفيزياء النووية، تلك الفيزياء التي تدرس الجسيمات الأولية والمادة المكثفة وغير ذلك الكثير.

ورغم ذلك، فثمة ما يضايق بين النظريتين، فمن غير الممكن أن تكون كلتاهما صحيحتين، على الأقل ليس في حالتهما الحالية؛ لأن كلًّا منهما تبدو متناقضة مع الأخرى، فالمجال الجاذبي موصوف دون وضع ميكانيكا الكم في الاعتبار، ودون تفسير أن المجالات عبارة عن مجالات كمية، وميكانيكا الكم مكونة دون الوضع في الاعتبار مسألة انحناء الزمكان ووصف معادلات أينشتاين له.

إن الطالب الجامعي الذي يحضر محاضرات عن النسبية العامة في الصباح، ويحضر محاضرات عن ميكانيكا الكم بعد الظهر قد يكون معذورًا إذا استنتج أن أساتذته حمقى أو أنهم لم يتحدثوا مع بعضهم البعض منذ قرن على الأقل، ففي الصباح يكون العالم عبارة عن زمكان «منحني» كل شيء فيه «مستمر»، وبعد الظهر يكون العالم «مسطحًا» تقفز فيه كمات الطاقة «المنفصلة» وتتفاعل.

ويكمن التناقض في أن كلتا النظريتين فعالتان على نحو مذهل.

ففي كل تجربة وفي كل اختبار تستمر الطبيعة في قول: «أنت على حق» للنسبية العامة، وتستمر في قول: «أنت على حق» لميكانيكا الكم أيضًا، على الرغم من الافتراضات المتناقضة ظاهريًّا التي تأسست عليها كلتا النظريتين، من الواضح أنه يوجد شيء ما زال يحيرنا.

وفي معظم المواقف من الممكن أن نتجاهل ميكانيكا الكم أو النسبية العامة (أو كلتاهما)، فالقمر أكبر من أن يتأثر بالحُبَيْبِيَّة الكمية الدقيقة؛ لذلك فمن الممكن أن نتجاهل الكمات عند وصف حركاته، على الجانب الآخر، فالذرة أخف من أن تتسبب في انحناء المكان لدرجة كبيرة، وعند وصفها من الممكن أن نتجاهل انحناء المكان، ورغم ذلك توجد مواقف يكون مهمًّا فيها كل من انحناء المكان والحُبَيْبِيَّة الكمية، وحتى هذه اللحظة ليس لدينا نظرية فيزياء مقبولة فعالة.

إن داخل الثقوب السوداء يُعَدُّ مثالًا على ذلك، ومن الأمثلة الأخرى ما حدث للكون أثناء الانفجار العظيم المسمى «البيج بانج»، وفي العموم، نحن لا نعرف كيف يتصرف الزمان والمكان على نطاق شديد الصغر، وفي كل هذه الأمثلة تصبح هذه النظريات المعاصرة مرتبكة وغير قادرة على إخبارنا عن أي شيء معقول؛ فمثلًا ميكانيكا الكم لا تستطيع التعامل مع انحناء الزمكان، والنسبية العامة لا تستطيع تفسير الكمات، وهذه هي مشكلة الجاذبية الكمية.

وتزداد المشكلة عمقًا، فقد فهم أينشتاين أن المكان والزمان مظاهر لمجال فيزيائي هو المجال الجاذبي، وفهم بور وهايزنبيرج وديراك أن المجالات الفيزيائية لها طابع كمي: فهي حُبَيْبِيَّة واحتمالية وتظهر من خلال التفاعلات، ومن ثم فلا بد أيضًا أن يكون المكان والزمان كيانين كميين يمتلكان هذه الصفات الغريبة.

ومن ثم، فما هو الفضاء الكمي؟ وما هو الزمان الكمي؟ هذه هي المشكلة التي نطلق عليها الجاذبية الكمية، ويبذل لفيف من علماء الفيزياء النظرية الموزعين حول القارات الخمس جهدًا مضنيًا لحل هذه المشكلة، وهدفهم هو إيجاد نظرية، أو لنَقُلْ مجموعة معادلات — بل فوق هذا رؤية متناسقة للعالم — يمكن من خلالها حل حالة الفصام الموجودة بين الكمات والجاذبية.

هذه ليست المرة الأولى التي تجد فيها الفيزياء نفسها في مواجهة نظريتين شديدتي النجاح لكن متناقضتين على نحو واضح، إن جهود الجمع بين النظريات حققت نتائج مثمرة في الماضي تمثلت في الخطوات الكبيرة التي قطعناها للأمام في فهمنا للعالم، فلقد اكتشف نيوتن الجاذبية العامة تحديدًا من خلال الجمع بين فيزياء جاليليو عن حركة الأشياء على الأرض وفيزياء كيبلر عن السماء، أما ماكسويل وفاراداي فقد كتبا معادلات الكهرومغناطيسية من خلال الجمع بين ما كان معروفًا عن الكهرباء وما كان معروفًا عن المغناطيسية، ووضع أينشتاين نظرية النسبية الخاصة من أجل حل الصراع الواضح بين ميكانيكا نيوتن وكهرومغناطيسية ماكسويل، ثم وضع نظرية النسبية العامة لحل الصراع الناتج بين ميكانيكا نيوتن ونظرية النسبية الخاصة.

ومن ثم يصبح علماء الفيزياء النظرية في حالة سعادة غامرة عندما يكتشفون صراعًا من هذا النوع؛ فهو فرصة استثنائية، والسؤال اللازم طرحه هو: هل نستطيع تكوين بنية مفاهيمية متوافقة مع ما تعلمناه عن العالم من «كلتا» النظريتين؟

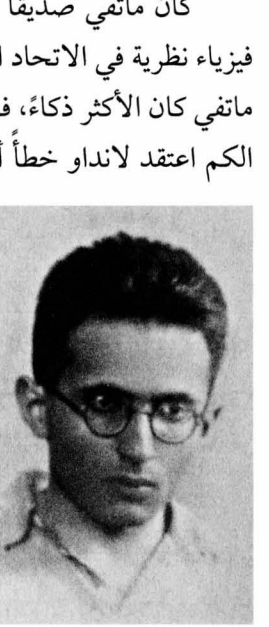
لكي نفهم ماهية المكان الكمي والزمان الكمي نحتاج مرة أخرى إلى أن نراجع بعمق طريقة فهمنا للأشياء، نحتاج إلى إعادة التفكير في قواعد فهمنا للعالم، فمثلما حدث مع أنكسيماندر الذي فهم أن الأرض تسبح في الفضاء، وأنه لا يوجد «فوق» و«تحت» في الكون؛ أو مثلما حدث مع

كوبرنيكوس الذي فهم أننا نتحرك في السماء بسرعة هائلة؛ أو مثلما حدث مع أينشتاين الذي فهم أن الزمكان يتقلص مثل الحلزون، وأن الزمن يمر بطريقة مختلفة في أماكن مختلفة ... فإن أفكارنا عن طبيعة الواقع تحتاج إلى التغيير مرة أخرى في إطار سعينا إلى رؤية متناسقة عن العالم متوافقة مع ما تعلمناه عنه.

أما أول من أدرك ضرورة تغيير الأساس المفاهيمي من أجل فهم الجاذبية الكمية فكان شخصية رومانسية وأسطورية، حيث كان الشاب الروسي ماتفي برونشتاين الذي عاش في عصر ستالين ومات ميتة مأساوية.

ماتفي

كان ماتفي صديقًا شابًّا للعالم ليف لانداو الذي سيصبح أفضل عالم فيزياء نظرية في الاتحاد السوفيتي، سيزعم الزملاء الذين عرفوا كلًّا منهما أن ماتفي كان الأكثر ذكاءً، فعندما كان هايزنبيرج وديراك يضعان قواعد ميكانيكا الكم اعتقد لانداو خطأً أن الكمات ستحول دون تحديد المجالات تحديدًا جيدًا؛ فقال: إن التذبذب الكمي سوف يمنعنا من قياس قيمة مكون المجال عند نقطة (منطقة صغيرة عشوائية) في الفضاء، وعلى الفور رأى بور العلامة أن لانداو مخطئًا، فدرس الموضوع بعمق وكتب مقالة طويلة ومفصلة يوضح فيها أن المجالات — مثل المجال الكهربي — سوف تظل واضحة التعريف حتى عند العمل بميكانيكا الكم.[١] ومن ثم صرف لانداو النظر عن الأمر.



الشكل (٥ - ١): ماتفي برونشتاين.

إلا أن الموضوع أثار اهتمام صديقه الشاب ماتفي عندما أدرك أن حدس لانداو وإن كان غير

دقيق إلا أنه ينطوي على أمر مهم، وأعاد التفكير نفسه الذي أظهر بور من خلاله أن المجال الكهربي الكمي محدد جيدًا عند نقطة في الفضاء، وبدلًا من تطبيقه على المجال الكهربي طبقه على المجال الجاذبي الذي كتب أينشتاين له المعادلات منذ سنوات قليلة، وتمثلت المفاجأة في أن لانداو كان محقًّا، فالمجال الجاذبي كان «غير» محدد جيدًا عند إحدى النقاط عند وضع الكمات في الاعتبار.

هناك طريقة حدسية لفهم ما يحدث، لنفترض أننا نريد مراقبة منطقة في الفضاء صغيرة جدًّا جدًّا جدًّا، ولفعل ذلك سنحتاج إلى وضع شيء في هذه المنطقة لتحديد النقطة التي نريد مراقبتها، ولنفترض أننا وضعنا أحد الجسيمات هناك، لقد فهم هايزنبيرج أننا لا يمكننا تحديد مكان الجسيم في نقطة في الفضاء لفترة طويلة؛ لأنه سرعان ما سيهرب، وكلما زاد صغر المنطقة التي نحاول تحديد مكان الجسيم فيها، زادت سرعة هروب الجسيم، (وهذا هو مبدأ عدم التأكد عند هايزنبيرج)، وإذا هرب الجسيم بسرعة كبيرة، فهذا يعني أن لديه قدر كبير من الطاقة، ولنطبق الآن نظرية أينشتاين، فالطاقة تجعل الفضاء ينحني، والكثير من الطاقة يعني أن الفضاء سوف ينحني بمعدل كبير، «والكثير» من الطاقة في منطقة «صغيرة» سوف يجعل الفضاء ينحني كثيرًا لدرجة سقوطه في أحد الثقوب السوداء مثل النجم المنهار، أما إذا سقط الجسيم في ثقب أسود، فلن نستطيع رؤيته، ولن نستطيع استخدامه كنقطة مرجعية لمنطقة في الفضاء، فلا يمكن التمكن من قياس مناطق الفضاء متناهية الصغر؛ لأننا إذا حاولنا فعل ذلك سوف تختفي المناطق داخل أحد الثقوب السوداء.

يمكن أن تصبح هذه الحجة أكثر تحديدًا إذا استخدمنا الرياضيات، إن النتيجة عامة، فالأخذ بكل من ميكانيكا الكم والنسبية العامة يتضمن وجود حد لقابلية انقسام الفضاء، وأسفل حد معين لا يسمح بشيء آخر، أي إنه لا يوجد شيء على وجه التحديد.

ما مدى صغر أقل منطقة في الفضاء؟ الحسبة بسيطة؛ فكل ما نحتاج إليه هو حساب الحد الأدنى لحجم الجسيم قبل سقوطه في الثقب الأسود، والنتيجة ستكون مباشرة، والحد الأدنى للطول سيكون حوالي:

$$L_P = \sqrt{\frac{hG}{c^3}}$$

تحت علامة الجذر التربيعي يوجد ثلاثة من ثوابت الطبيعة التي قابلناها بالفعل، وهي كالتالي: ثابت نيوتن الذي يرمز له بالرمز G الذي ناقشناه في الفصل الثاني، وهو يحدد قوة الجاذبية؛ وسرعة الضوء C المقدمة في الفصل الثالث عندما ناقشنا النسبية، وهو يتناول الحاضر الممتد؛ وثابت بلانك h الموجود في الفصل الرابع، وهو يحدد نطاق الحُبَيْبِيَّة الكمية،* إن وجود هذه الثوابت الثلاثة يؤكد أننا ننظر إلى شيء متعلق بالجاذبية (G)، والنسبية (c)، وميكانيكا الكم (h).

أما الطول L_p المحدد بهذه الطريقة فيُطْلَق عليه طول بلانك، ومن المفترض أن يُطْلَق عليه طول بونشتاين لكن هذا هو حال الدنيا، ومن الناحية العددية فهو يساوي تقريبًا لمليون من مليار من مليار من مليار من السنتيمتر (10^{-33} سنتيمتر)، ومن ثم فيمكن القول: إنه ... صغير.

وعلى هذا النطاق شديد الصغر تظهر الجاذبية الكمية نفسها، ولتوضيح فكرة صغر النطاق الذي نناقشه افترض أننا كبرنا قشرة الجوز إلى أن أصبحت في حجم الكون المرئي برمته، ورغم ذلك فإننا لن نستطيع رؤية طول بلانك، وعلى الرغم من تكبيره بهذه الطريقة الهائلة، فإنه سيظل أصغر بملايين المرات من قشرة الجوز الفعلية قبل تكبيرها، وعند هذا النطاق يغير المكان والزمان طبيعتهما، فيصبحان شيئًا مختلفًا، حيث يصبحان «مكان وزمان كميين»، وفهم ما يعنيه ذلك هو المشكلة.

* العلامة الموجودة على ثابت بلانك h توضح فقط أن ثابت بلانك في هذه المعادلة مقسومًا على 2π، وهي إضافة أخرى غير مفيدة وغريبة أضافها علماء الفيزياء النظرية؛ فلقد وضعوا شرطة حادة صغيرة وصعبة على حرف h «لجعله أنيقًا».

فهم ماتفي برونشتاين كل ذلك في ثلاثينيات القرن العشرين وكتب مقالتين قصيرتين وملهمتين أوضح فيهما أنه عند الأخذ بكلٍ من ميكانيكا الكم والنسبية العامة تبدو كلتاهما غير متوافقة مع فكرتنا المعتادة عن الفضاء كسلسلة متصلة قابلة للانقسام اللانهائي.[٢]

ورغم ذلك، فهناك مشكلة، لقد كان ماتفي وليف من أتباع الشيوعية المخلصين، لقد كانا يريان أن الثورة هي السبيل لتحرير البشرية ولبناء مجتمع أفضل من كل النواحي يخلو من الظلم ومن أشكال عدم المساواة الكثيرة التي نراها تزداد على نحو ممنهج في كل أنحاء العالم، بالإضافة إلى ذلك، فقد كانا من أتباع لينين المتحمسين، وعندما اعتلى ستالين السلطة أصابتهما الحيرة، ثم مالا إلى الانتقاد ثم العدوانية، وكتبا مقالات كانت معتدلة لكنها انتقادية على نحو صريح ... فهذه لم تكن الشيوعية التي أراداها ...

إلا أن هذه الأيام كانت أيامًا صعبة، ووجد لانداو صعوبة في تجاوزها، لكنه نجى، وبعد عام من تمكن ماتفي من أن يكون أول شخص يدرك أن أفكارنا عن الزمان والمكان يجب أن تتغير جذريًا، فقد ألقت شرطة ستالين القبض عليه وحُكِمَ عليه بالإعدام، ونُفِّذَ حكم الإعدام في يوم محاكمته في ١٨ فبراير عام ١٩٣٨، وكان عمره ثلاثين عامًا.[٣]

جون

بعد موت ماتفي برونشتاين المبكر حاول كثير من أبرز علماء الفيزياء في القرن العشرين حل لغز الجاذبية الكمية، فخصص ديراك السنوات الأخيرة من حياته لهذه المشكلة، فاتحًا السبل ومقدمًا أفكارًا وأساليب قام على أساسها قدر كبير من العمل الحالي المتعلق بميكانيكا الكم، وبفضل هذه الأساليب نعرف اليوم كيف نصف عالمًا خاليًا من الزمن، وهذا ما سوف أتناوله لاحقًا، وحاول فاينمان تعديل الأساليب التي طورها للإليكترونات والفوتونات لتتوافق مع سياق النسبية العامة لكنه باء بالفشل، فالإليكترونات

والفوتونات كمات في الفضاء، والجاذبية الكمية شيء مختلف فهي ليست كافية لوصف «الجرافيتونات» المتحركة في الفضاء، فالفضاء نفسه هو ما يلزم حسابه بميكانيكا الكم.

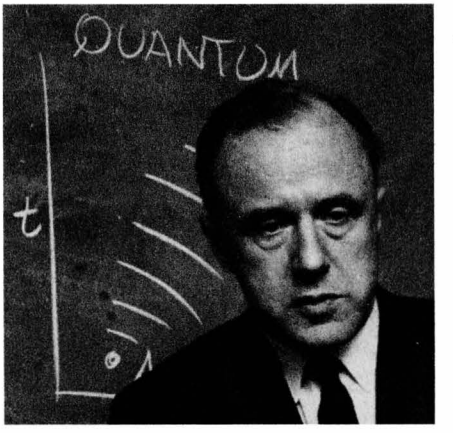
ومُنِحَت بعض جوائز نوبل لعلماء فيزياء حاولوا حل مشاكل أخرى عن طريق الخطأ تقريبًا أثناء محاولات حل لغز الجاذبية الكمية، وحصل اثنان من علماء الفيزياء الهولنديين على جائزة نوبل عام ١٩٩٩ وهما: جيرارت هوفت ومارتينوس فيلتمان؛ لأنهما أوضحا توافق النظريات المستخدمة حاليًا لوصف القوى النووية — جزء من النموذج المعياري — لكن برنامجهما البحثي كان يهدف في الواقع إلى إظهار توافق إحدى نظريات الجاذبية الكمية، لقد كانا يعملان على نظريات هذه القوى الأخرى كتمرين تمهيدي، وحصلا على جائزة نوبل بسبب هذا «التمرين التمهيدي»، لكنهما لم ينجحا في إظهار توافق نسختهما من الجاذبية الكمية.

يمكن أن تمتد القائمة وأن تبدو مثل سجل شرف لأبرز علماء الفيزياء النظرية في القرن العشرين، علاوة على ذلك، فمن الممكن أيضًا أن تبدو كسجل للإخفاقات، ورغم ذلك، فتدريجيًا جدًّا وعلى مدار عقود، اتضحت الأفكار واستكشفت المعضلات وأقفل باب تداولها مما حقق فائدة؛ حيث أصبحت الأساليب والأفكار العامة أكثر قوة، وبدأت النتائج في التراكم من تطور إحداها من الأخرى، ولو حاولنا ذكر العلماء الكثيرين الذين ساهموا في هذا البناء الجماعي التدريجي بطيء الإيقاع فسوف نحتاج إلى قائمة مملَّة من الأسماء تذكر كل مَنْ ساهم بذرة أو حجر في هذه العملية.

أود أن أذكر واحدًا فقط من هذه الأسماء، فهو الذي ظل ممسكًا بخيوط هذا البحث الجماعي لسنوات، إنه الإنجليزي الرائع الشاب دائمًا الذي جمع بين الفلسفة والفيزياء كريستوفر إيشام، عندما كنت أقرأ إحدى مقالاته التي تتناول مشكلة الجاذبية الكمية أصبحت مغرمًا لأول مرة بهذه المشكلة، لقد شرحت المقالة لماذا كانت المشكلة بالغة الصعوبة، وكيف

أن تصورنا عن المكان والزمان لا بد من تعديله، وقدمت استعراضًا واضحًا لكل الطرق التي اتُّبِعَت في ذلك الوقت، والنتائج التي تحققت، والصعوبات التي انطوت عليها هذه العملية، كنت في السنة الثالثة في الجامعة، وأبهرتني احتمالية إعادة التفكير في المكان والزمان من البداية، ولم يقل هذا الانبهار منذ ذلك الحين، فكما قال الشاعر بترارك: «الجرح لا يندمل بضعف الانحناء.»

أما العالم الذي يُعَد أكبر من ساهم في مجال الجاذبية الكمية فهو جون ويلر، هذا الشخص العظيم الذي درس مليًّا فيزياء القرن الماضي، لقد كان تلميذًا لنيلز بور في كوبنهاجن وشريكًا له، وتعاون مع أينشتاين عندما انتقل أينشتاين إلى الولايات المتحدة، وكان معلمًا من بين تلاميذه شخصيات مثل ريتشارد فاينمان ... لقد كان ويلر في قلب فيزياء القرن العشرين، لقد كان يمتلك خيالًا خصبًا، لقد كان من اخترع مصطلح «الثقب الأسود» وروج له، ويرتبط اسمه بالأبحاث المطولة الأولية — الحدسية أكثر منها رياضية في الغالب — المتعلقة بطريقة التفكير في الزمكان الكمي، لقد استوعب درس برونشتاين الذي أوضح فيه أن صفات المجال الجاذبي الكمية تنطوي على تعديل فكرة الفضاء على نطاق صغير، وبحث ويلر عن أفكار جديدة تساعد في تصور المكان الكمي، وتخيل أنه سحابة من الهندسيات المتراكبة، تمامًا مثلما يمكننا أن نفكر في الإليكترون الكمي كسحابة من المواقع.



الشكل (٥ - ٢): جون ويلر.

تخيل أنك تنظر على البحر من ارتفاع كبير، وسترى

مساحة شاسعة منه عبارة عن مسطح سماوي مستوٍ، وإذا نزلت ورأيته عن مقربة فسوف تبدأ في رؤية الأمواج العاتية التي تبتلعها الرياح، وإذا نزلت أكثر فسوف ترى أن الأمواج تتكسر وأن سطح البحر زبد مضطرب، وهكذا يبدو الفضاء كما تخيله ويلر،* فوفقًا لمقياسًا الذي يفوق طول بلانك بنحو هائل، يبدو الفضاء مستويًا، أما إذا نزلنا إلى مستوى بلانك فإنه يتهشم ويتزبد.

بحث ويلر عن طريقة لوصف هذا الفضاء المتزبد الذي يشبه موجة الاحتمالات مختلفة الهندسيات، وفي عام ١٩٦٦ قدم الحل زميل شاب يعيش في كاليفورنيا يُدْعَى برايس دويت،[٤] كان ويلر كثير السفر ويقابل أعوانه في أي مكان يشاء، وطلب من برايس مقابلته في مطار رالي دورهام في كارولينا الشمالية حيث يقضي ساعات قليلة منتظرًا رحلته المكملة، ووصل برايس وأراه معادلة «لدالة موجية للفضاء» حصل عليها باستخدام حيلة رياضية بسيطة،** وتحمس ويلر للمعادلة، ومن هذه المحادثة وُلِدَ ما يشبه «معادلة للمدارات» للنسبية العامة؛ إنها معادلة ستحدد احتمالية أحد الفضاءات المنحنية، ولوقت طويل أسماها دويت معادلة ويلر،*** بينما كان يسميها ويلر معادلة دويت، أما الجميع فيطلقون عليها معادلة ويلر دويت.

الفكرة جيدة جدًّا وأصبحت أساسًا لمحاولات إعادة بناء النظرية الكاملة للجاذبية الكمية، ورغم ذلك، فالمعادلة نفسها تعج بالمشاكل، وهي مشاكل خطيرة، ففي المقام الأول سنجد أن المعادلة غير محددة جيدًا من الناحية الرياضية، فإذا حاولنا استخدامها لإجراء بعض الحسابات،

---

* لسماع هذه الاستعارة بصوته مباشرةً اذهب لهذا الموقع http://www.webofstories.com/play/9542?0=MS.

** وضع دويت محل المشتقات مؤثرات اشتقاقية في معادلة هاميلتون جاكوبي للنسبية العامة (التي كتبها بيريز قبل فترة قليلة)، أي إنه فعل ما قام به شرودنجر لكتابه معادلته في عمله الأول، حيث وضع بدل المشتقات مؤثرات اشتقاقية في معادلة هاميلتون جاكوبي للجسيم.

*** أو معادلة «أينشتاين شرودنجر».

فسرعان ما سنحصل على نتائج لا نهائية لا معنى لها، ومن ثم، لا بد من تحسينها.

إلا أنه من الصعب أيضًا فهم طريقة تفسير هذه المعادلة لمعرفة ما تعنيه، فمن بين صفاتها المربكة أن متغير الزمن لم يعد موجودًا، فكيف يمكن استخدامها لحساب تطور شيء يحدث في الزمن إذا كانت لا تحتوي على متغير زمني؟ في الفيزياء دائمًا ما تحتوي المعادلات الديناميكية على متغير الزمن (t)، فما الذي تدل عليه نظرية فيزيائية خالية من متغير زمني؟ ستدور الأبحاث على مدار سنوات حول هذه الأسئلة في محاولة لمراجعة المعادلة بطرق شتى من أجل تحسين تعريفها وفهم معناها المحتمل.

أولى خطوات الحلقات

بدأ الضباب ينقشع قرب نهاية ثمانينيات القرن العشرين، ومن المفاجئ أن بعض الحلول لمعادلة ويلر دويت بدأت في الظهور، وخلال هذه السنوات وجدت نفسي أولًا في جامعة سيراكيوز في ولاية نيويورك في زيارة للفيزيائي الهندي أبهاي أشتيكار، ثم في كونتيكت في جامعة ييل في زيارة للفيزيائي الأمريكي لي سمولين، أذكر أن هذه الفترة كانت فترة مناقشات حامية الوطيس وحماس فكري متقد، أعاد أشتيكار كتابة معادلة ويلر دويت بطريقة أبسط؛ وتعاون سمولين مع تيد جاكوبسون من جامعة مريلاند في واشنطن وأصبحا أول من يجد بعضًا من هذه الحلول الغريبة الجديدة للمعادلة.

كانت الحلول تتسم بصفة غريبة؛ حيث اعتمدت على «الخطوط المغلقة» في الفضاء، والخط المغلق عبارة عن «حلقة»، تمكن سمولين وجاكوبسون من كتابة حل لمعادلة ويلر دويت لكل حلقة؛ أي لكل خط منغلق على نفسه، فما معنى ذلك؟ نشأت الأعمال الأولى مما سيصبح لاحقًا معروفًا باسم نظرية الجاذبية الكمية الحلقية من هذه المناقشات عندما اتضح

تدريجيًا معنى هذه الحلول المقدمة لمعادلة ويلر دويت، وعلى أساس هذه الحلول بدأت تتكون تدريجيًا نظرية متسقة وورثت اسم «النظرية الحلقية» من أول الحلول المدروسة.

وحاليًا يوجد مئات العلماء الذين يعملون على هذه النظرية في جميع أنحاء العالم، من الصين إلى الأرجنتين، ومن إندونيسيا إلى الولايات المتحدة، وما يتكون ببطء هو النظرية المعروفة حاليًا باسم النظرية الحلقية أو الجاذبية الكمية الحلقية؛ والفصول التالية مخصصة لهذه النظرية، وهذا ليس الاتجاه الوحيد المستكشف بحثًا عن نظرية كمية للجاذبية، بل هو أكثر الاتجاهات المبشرة من وجهة نظري.*

* أشهر بديل لنظرية الجاذبية الكمية الحلقية هو نظرية الأوتار، وأهم اهتماماتها ليس التركيز على دراسة الصفات الكمية للمكان والزمان، بل كتابة نظرية موحدة لكل المجالات المعروفة، وهذا هدف قد يكون سابقًا لأوانه في ظل المعرفة الحالية.

الفصل السادس

كمات الفضاء

انتهى الفصل السابق بحلول معادلة ويلر دويت التي اكتشفها كلٌّ من جاكوبسون وسمولين، واعتمدت هذه الحلول على الخطوط المنغلقة على نفسها أو الحلقات، فما معنى كل هذا؟

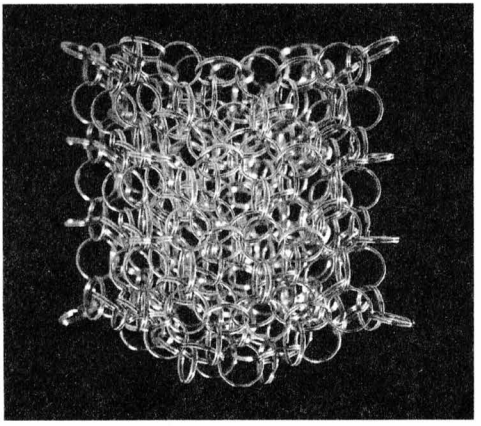
هل تذكر خطوط فاراداي، تلك الخطوط التي تحمل القوة الكهربية التي تملأ الفضاء من وجهة نظر فاراداي؟ تلك الخطوط التي نشأ منها مفهوم «المجالات»؟ حسنًا، الخطوط المغلقة التي ظهرت في حلول معادلة ويلر دويت هي خطوط فاراداي للمجال الجاذبي.

ورغم ذلك فقد أضيف إلى فكرة فاراداي مكونين جديدين، أولهما أننا نتعامل مع النظرية الكمية، وفي النظرية الكمية كل شيء محدد، وهذا يعني أن شبكة العنكبوت المستمرة الرفيعة على نحو لا نهائي المكونة لخطوط فاراداي أصبحت الآن شبيهة بشبكة عنكبوت حقيقية، أي لها عدد محدد من الخيوط المحددة، وكل خط يحدد حلًّا من حلول معادلة ويلر دويت يصف واحدًا من خيوط هذه الشبكة.

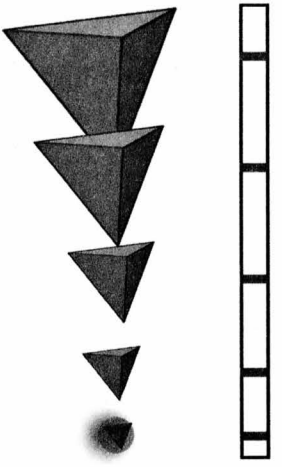
أما المكون الثاني والأهم هو أننا نتحدث عن الجاذبية، ومن ثم وكما فهم أينشتاين فإننا لا نتحدث عن مجالات مغمورة في الفضاء، بل نتحدث عن بنية الفضاء نفسه، إن خطوط فاراداي للمجال الجاذبي الكمي هي نفسها الخيوط المنسوج منها الفضاء.

في البداية ركزت الأبحاث على هذه الخطوط، وكيف يمكن أن

«تنسج» الفضاء المادي ثلاثي الأبعاد، ويمثل الشكل (٦ -١) محاولة مبدئية لإعطاء فكرية حدسية عن بنية الفضاء المحددة الصادرة عنها.



الشكل (٦ - ١): النسخة الكمية لخطوط قوى فاراداي التي تنسج الفضاء كشبكة ثلاثية الأبعاد مكونة من دوائر مترابطة (حلقات).



الشكل (٦ - ٢): طيف الحجم: حجوم رباعي السطوح المنتظم الممكنة في الطبيعة محدودة العدد، والأصغر الموجود في القاعدة هو أصغر حجم في الوجود.

بعد فترة قصيرة، وبفضل الأفكار الحدسية والقدرة الرياضية لعلماء شباب أمثال الأرجنتيني: خورخيه بولين والبولندي يوريك ليفاندوفسكي، أصبح واضحًا أن السبيل لفهم فيزياء هذه الحلول يكمن في نقاط تقاطع هذه الخطوط، ويطلق على هذه النقاط عقد، وتسمى الخطوط الواصلة بين العقد روابط، وتكون مجموعة الخطوط المتقاطعة ما يسمى بالمخطط، أي مجموعة عقد متصلة بروابط كما في الشكل (٦ -٣).

في الواقع، يظهر الحساب أنه بدون هذه العقود لا يكون للفضاء المادي أي حجم، وهذا يعني أن حجم الفضاء «يكمن» في عقد المخطط وليس في الخطوط، فهذه الخطوط «تربط معًا» الحجوم المنفصلة القابعة في العقد.

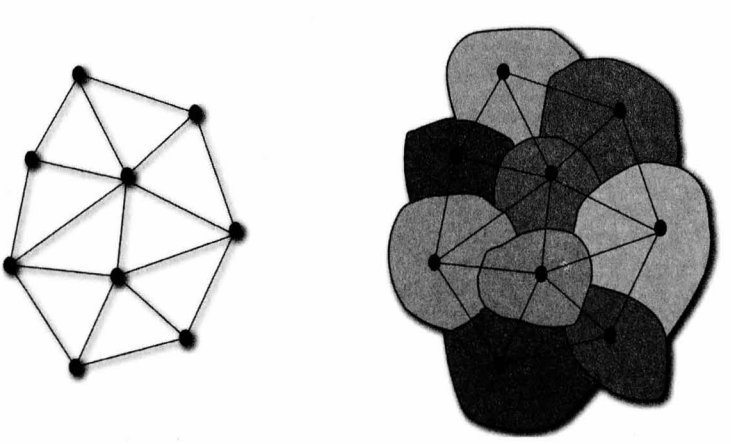
استغرق الوصول لتوضيح كامل للصورة الناتجة عن الزمكان الكمي سنوات كثيرة، فقد كان من الضروري تحويل الرياضيات سيئة التحديد في معادلة ويلر دويت إلى بنية محددة جيدًا على نحو يسمح بإجراء حسابات بها، وبهذه الطريقة أصبح من الممكن تحقيق نتائج محددة، والنتيجة التقنية الأساسية التي توضح المعنى الفيزيائي للمخططات هي حساب أطياف الحجم والمنطقة.

طيف الحجم والمنطقة

تأمل أي منطقة ولتكن الغرفة التي تقرأ فيها هذا الكتاب إذا كنت جالسًا في غرفة، ما مدى كبر الغرفة؟ إن حجم فضاء الغرفة يقاس بحجمها، فالحجم كمية هندسية تعتمد على هندسية الفضاء، لكن هندسة الفضاء — كما فهمها أينشتاين وكما ذُكِرَت في الفصل الثالث — عبارة عن مجال جاذبي، ومن ثم فالحجم عبارة عن صفة للمجال الجاذبي تعبر عن كمية المجال الجاذبي الموجود بين جدران الغرفة، إلا أن المجال الجاذبي هو كمية أيضًا، ومثل كل الكميات الفيزيائية فإنه يخضع لقوانين ميكانيكا الكم،

وبصفة خاصة، فإن الحجم مثل كل الكميات الفيزيائية قد لا يتخذ قيمًا عشوائية بل يتخذ قيمًا محددة فقط كما وصفت في الفصل الرابع، وإذا كنت تتذكر فإن قائمة كل القيم الممكنة تسمى الطيف، ومن ثم لا بد من وجود «طيف حجم» (انظر الشكل (٦ -٢)).

قدم لنا ديراك المعادلة التي نحسب بها طيف كل متغير، واستغرق الحساب بعض الوقت لتكوين المعادلة أولًا ثم لإكمالها، وتسبب لنا في المعاناة، لقد اكتملت في منتصف تسعينيات القرن العشرين، وكان الحل كالمتوقع (فقد كان فاينمان يقول: إننا يجب ألا نحسب دون معرفة النتيجة أولًا)، فقد كان طيف الحجم محددًا، أي إن الحجم لا يمكن إلا أن يكون مكونًا من «حزم محددة»، وهذا يشبه نسبيًّا طاقة المجال الجاذبي المكون أيضًا من حزم محددة هي الفوتونات.



الشكل (٦ - ٣): على اليسار، مخطط مكون من عقد متصلة بروابط، على اليمين، حبيبات الفضاء التي يمثلها المخطط، توضح الروابط الجسيمات المجاورة التي تفصلها الأسطح.

تمثل العقد الموجودة في المخطط حزم الحجم المحددة، وكما هو الحال مع الفوتونات، فلا يمكن إلا أن تتخذ حجومًا معينة يمكن حسابها

باستخدام معادلة الكمية العامة لديراك،* كل عقدة n لها حجمها الخاص v_n: أي أحد أرقام طيف الحجم، العقد هي الكمات الأولية التي يتكون منها الفضاء المادي، وكل عقدة في المخطط عبارة عن «جسيم كمي للفضاء»، والبنية الناشئة هي تلك الموضحة في الشكل (٦ -٣).

الرابط عبارة عن كمة فردية لخط من خطوط فاراداي، والآن يمكننا أن نفهم ما تمثله؛ فإذا تخيلت أن العقدتين عبارة عن «منطقتي فضاء» صغيرتين فستكون هاتين المنطقتين منفصلتين من خلال سطح صغيرة، وحجم هذا السطح هو «مساحته»، والصفة الثانية بعد الحجم التي تميز شبكات الفضاء الكمية هي المنطقة المرتبطة بكل خط.**

والمساحة كما هو الحال مع الحجم ما هي إلا متغير فيزيائي، ولها طيف يمكن حسابه باستخدام معادلة ديراك،*** فالمساحة ليست ممتدة بل

---

* معادلة القيمة الذاتية لمؤثر الحجم.

** حيث حالات الجاذبية الكمومية موضحة على النحو التالي $|j, v_n>$، حيث ترمز n إلى العقد وترمز 1 إلى روابط المخطط.

*** نتيجة الحساب بسيطة، وأعرضها هنا كي تعرف كيف يعمل طيف ديراك، القيم المحتملة للمساحة A معروضة في المعادلة التالية، حيث j «عدد نصف صحيح» مثل:

$$0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2}, 3 \cdots$$

$$A = 8\pi L_P^2 \sqrt{j\,(j+1)}$$

تمثل A المساحة التي يمكن أن يشغلها السطح الفاصل بين حبيبتين من الفضاء، ويمثل ٨ الرقم ثمانية ولا شيء مميز فيه، والرمز π هو الرمز الإغريقي للثابت الرياضي ط المسمى بالإغريقي باي الذي ندرسه في المدارس، وهو الثابت الذي يمثل العلاقة بين محيط الدائرة وقطرها، والذي يظهر في كل مكان في الفيزياء ولا أعلم سبب ذلك، أما الرمز L_P فهو طول بلانك المقياس بالغ الصغر الذي تحدث عنده ظواهر الجاذبية الكمية، والرمز L^2P هو مربع L_P وهو المساحة (بالغة الصغر) لمربع صغير أضلاعه مساوية لطول بلانك، ومن ثم فإن $8\pi L^2P$ هو ببساطة مساحة «صغيرة»، فهي مساحة مربع صغير جدًّا ضلعه يساوي تقريبًا مليون من مليار من مليار من مليار من السنتيمتر أي 10^{-66} سنتيمتر =

حُبَيْبِيَّة، فليس هناك ما يسمى مساحة متناهية الصغر.

يبدو الفضاء ممتدًّا أمامنا فقط لأننا لا نستطيع إدراك المقياس الصغير لكمات الفضاء الفردية، فالأمر أشبه بحالنا عندما ننظر عن كثب إلى قماش التيشيرت فإننا نرى أنه منسوج من خيوط صغيرة.

عندما نقول: إن حجم الغرفة ١٠٠ سنتيمتر مكعب على سبيل المثال،

= مربع، السمة المثيرة في المعادلة هي الجذر التربيعي وما داخله، النقطة الأساسية أن j عدد نصف صحيح، أي إنه يمكن أن يأخذ فحسب قيمًا عبارة عن مضاعفات النصف ½، وللجذر قيمة معينة لكل عدد من هذه الأعداد نصف الصحيحة موضحة تقريبيًا في الجدول (٦ -١).

الجدول (٦-١): اللف المغزلي (أعداد نصف صحيحة) وقيمة المساحة المرادفة في وحدات المساحات الأصغر.

j	$\sqrt{j(j+1)}$
$\frac{1}{2}$	0.8
1	1.4
$\frac{3}{2}$	1.9
2	2.4
$\frac{5}{2}$	2.9
3	3.4
—	—

بضرب الأعداد في العمود الأيمن في المساحة $8\pi L^2_P$ فإننا نحصل على القيم المحتملة لمساحة السطح، وهذه القيم الخاصة تشبه القيم التي تظهر عند دراسة مدارات الإليكترونات في الذرات، حيث تسمح ميكانيكا الكم بمدارات معينة فقط، الفكرة أنه لا «توجد» أي مساحات أخرى غير تلك القيم المستخرجة من هذه المعادلة، فلا يوجد سطح يمكن أن تكون مساحته عُشر $8\pi L^2_P$.

فإننا فعليًّا «نعد» حبيبات الفضاء — كمات المجال الجاذبي — التي تحتوي عليها، وفي الغرفة يكون لهذا العدد ما يزيد عن مائة رقم، وعندما نقول: إن مساحة هذه الصفحة ٢٠٠ سنتيمتر مربع، فإننا فعليًّا نعد عدد الروابط في الشبكة أو الحلقات الممتدة على الصفحة، فعلى صفحة هذا الكتاب يبلغ عدد الكمات سبعين رقم تقريبًا.

لقد طرح رايمان بنفسه في القرن التاسع عشر فكرة أن قياس الطول أو المساحة أو الحجم عبارة عن عد للعناصر الفردية، إن عالم الرياضيات الذي وضع نظرية الفضاءات الرياضية المنحنية «الممتدة» كان مدركًا بالفعل أن الفضاء المادي «المحدد» أكثر عقلانية في نهاية المطاف من الفضاء الممتد.

وتلخيصًا لما سبق فإن نظرية الجاذبية الكمية الحلقية أو النظرية الحلقية تجمع ما بين النسبية العامة وميكانيكا الكم بطريقة معتدلة نسبيًّا؛ لأنها لا تتبنى افتراضات سوى تلك المذكورة في النظريتين والتي أعيدت كتابتها بطريقة مناسبة لتجعل النظريتين متوافقتين، ورغم ذلك، فقد أحدثت العواقب تغييرات جذرية.

لقد علمتنا النسبية العامة أن الفضاء شيء ديناميكي مثل المجال الكهرومغناطيسي؛ فهو حلزون هائل متحرك مغمورين فيه، يتمدد وينحني، وعلمتنا ميكانيكا الكم أن كل مجال من هذا النوع مكون من كمات، أي له بنية حُبَيْبِيَّة رقيقة، ومن ثم فالفضاء المادي نظرًا لكونه مجالًا فإنه مكون من كمات أيضًا، والبنية الحُبَيْبِيَّة نفسها التي تميز المجالات الكمية الأخرى تميز أيضًا المجال الجاذبي الكمي، ومن ثم الفضاء؛ ولذلك نتوقع أن يكون الفضاء حبيبيًّا، ونتوقع وجود كمات للجاذبية مثلما يوجد كمات للضوء وكمات للمجال الكهرومغناطيسي، ونظرًا لأن الجسيمات عبارة عن كمات للمجالات الكمية، إلا أن الفضاء مجال جاذبي، وكمات المجال الجاذبي عبارة عن كمات فضاء؛ أي المكونات الحُبَيْبِيَّة للفضاء.

ومن ثم فإن التوقع المحوري للنظرية الحلقية هو أن الفضاء ليس متسلسلًا، وغير قابل للانقسام إلى ما لا نهاية، بل يتكون من «ذرات فضاء»، فهي أصغر من أصغر الأنوية الذرية بمليارات مليارات المرات.

تصف النظرية الحلقية هذه البنية الذرية والحُبَيْبِيَّة للفضاء بطريقة رياضية دقيقة، وحصلت على هذا الوصف من خلال تطبيق معادلات ميكانيكا الكم العامة التي كتبها ديراك لمجال أينشتاين الجاذبي.

وبصفة خاصة، تحدد النظرية الحلقية أن الحجم (حجم مكعب معين على سبيل المثال) لا يمكن أن يكون متناهي الصغر؛ بل يوجد حد أدنى للحجم، فلا يوجد فضاء أصغر من هذا الحجم الأدنى، يوجد حد أدنى كمي للحجم وهو ذرة الفضاء الأولية.

ذرات الفضاء

أتذكر أخيل عندما كان يسابق السلحفاة؟ لاحظ زينون وجود صعوبة في قبول فكرة أنه لا بد أن يقطع أخيل عددًا لا نهائيًّا من المسافات قبل أن يصل إلى هذا المخلوق بطيء الحركة، ووجدت الرياضيات حلًّا ممكنًا لهذه المعضلة، وأوضحت كيف أن عددًا لا نهائيًّا من المسافات الفاصلة متزايدة الصغر يمكن أن تكون في النهاية مسافة فاصلة كلية نهائية.

لكن هل يحدث هذا «حقًّا» في الطبيعة؟ هل توجد مسافات فاصلة بين أخيل والسلحفاة يمكن أن تكون متناهية القصر؟ هل من المعقول أن نتحدث عن مليار من المليار من المليار من الملليمتر، ثم نفكر بعد ذلك في تقسيمه مرة أخرى إلى عدد لا يُحْصَى من المرات؟

يوضح حساب الأطياف الكمية للكميات الهندسية أن الجواب منفي؛ فلا يوجد أجزاء من الفضاء متناهية الصغر، هناك حد أدنى لقابلية الفضاء للتقسيم، إنه حقًّا على مقياس شديد الصغر لكنه موجود، وهذا ما خمنه

ماتفي برونشتاين في ثلاثينيات القرن العشرين، وحساب أطياف الحجم والمساحة يؤكد فكرة برونشتاين ويضعها في إطار رياضي دقيق.

إن أخيل ليس في حاجة إلى عدد لا نهائي من الخطوات للوصول إلى السلحفاة؛ لأنه في ظل الفضاء المكون من حبيبات محدودة الحجم لا توجد خطوات صغيرة على نحو لا نهائي، وسوف يستمر البطل أخيل في الاقتراب من السلحفاة إلى أن يصل لها في النهاية بقفزة كمية واحدة.

أما إذا تفكرنا فسوف نتساءل: أوليس هذا تقريبًا الحل الذي اقترحه كلٌّ من ليوكيبوس وديموقريطوس؟ لقد تحدثا عن البنية الحُبَيْبِيَّة للمادة، ولسنا متأكدين على الأغلب مما قالاه بالتحديد عن الفضاء، للأسف ليس لدينا كتبهما، وعلينا أن نتدبر أمرنا بالنصوص القليلة التي اقتبسها الآخرون من كتاباتهما، فالأمر أشبه بإعادة كتابة مسرحيات شكسبير من قائمة اقتباسات من مسرحياته،* ومن الممكن أن نطبق على الفضاء الحجة التي أوردها أرسطو عن ديموقريطوس حيث بين غرابة فكرة تكون التسلسل من مجوعة من النقاط، أعتقد أننا لو تمكنا من سؤال ديموقريطوس عما إذا كان من المنطقي تقسيم مسافة مكانية فاصلة إلى ما لا نهاية، فسوف يكون جوابه الوحيد هو تكرار أن القابلية للتقسيم لا بد أن يكون لها حد، يرى فيلسوف أبديرة أن المادة مكونة من ذرات لا يمكن تقسيمها، وبما أنه فهم أن الفضاء شديد الشبه بالمادة — فالفضاء مثلما قال بنفسه: له طبيعة خاصة «فيزياء معينة» — فإنني أشك في أنه لم يكن ليتردد في استنتاج أن الفضاء أيضًا مكون من قطع أولية لا يمكن تقسيمها، إننا على الأرجح، نسير فحسب على خطى ديموقريطوس.

بالتأكيد لا أقصد الإيحاء بأن فيزياء ألفيتين من الزمان ليس لها

---

* تخيل مزيج الأفكار غير المنطقية التي كنا سنجدها إذا كان لدينا فقط تعليقات على أعمال أرسطو وأفلاطون كتبها آخرون وكنا غير قادرين على الاطلاع على وضوح وتعقيد أعمالهما الأصلية!

فائدة، وأن التجارب والرياضيات عديمة الفائدة، وأن ديموقريطوس يمكن أن يكون مقنعًا مثل العلوم الحديثة، من الواضح أن هذا ليس المقصود، فبدون التجارب والرياضيات لم نكن لنفهم أبدًا ما فهمنا، ورغم ذلك فإننا نكون خطتنا المفاهيمية لفهم العالم من خلال استكشاف الأفكار الجديدة، بالإضافة إلى الاستعانة بالتخمينات القوية التي قدمتها شخصيات عظيمة من الماضي، وديموقريطوس أحد هذه الشخصيات، فنحن نكتشف الجديد بالجلوس على كتفيه العملاقتين.

أما الآن فدعونا نعود إلى الجاذبية الكمية.

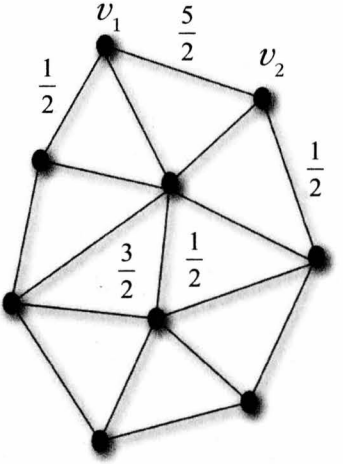
شبكات اللف المغزلي

تتسم المخططات التي تصف الحالات الكمومية للفضاء بحجم v لكل عقدة وعدد نصف صحيح j لكل خط، والمخطط الذي يحمل هذه المعلومات يُطْلَق عليه شبكة اللف المغزلي (انظر الشكل (٦ -٤))، (يطلق على الأعداد نصف الصحيحة في الفيزياء «اللف المغزلي»؛ لأنها تظهر في فيزياء كم الأشياء الدوارة.) تمثل شبكة اللف الحالة الكمومية للمجال الجاذبي: الحالة الكمومية للفضاء؛ ذلك الفضاء الحبيبي محدد المساحة والحجم، تستخدم الشبكات الدقيقة في كل مكان آخر في الفيزياء لتقريب الفضاء الممتد، أما هنا فليس هناك فضاء ممتد لتقريبه، فالفضاء حبيبي حقًّا.

الفرق الجوهري بين الفوتونات (كمات المجال الكهرومغناطيسي) وعقد المخطط (كمات الجاذبية) هي أن الفوتونات موجودة في الفضاء، بينما كمات الجاذبية تكون الفضاء بنفسها، تتميز الفوتونات «بمكان وجودها»،* أما كمات الفضاء فليس لها مكان توجد فيه؛ لأنها نفسها هي المكان، معلومة واحدة تميزها مكانيًّا، وهي المعلومة المتعلقة بكمات

* العدد الكمي لحالات الفوتونات في فضاء فوك هو الزخم، تحويل فورييه لموقع الجسيم.

الفضاء الأخرى المجاورة لها، وأيهما مجاورة للأخرى، وتعبر الروابط الموجودة في المخطط عن هذه المعلومات، والعقدتان المرتبطتان برابط هما عقدتان متقاربتان، إنهما حبيبتان من حبيبات الفضاء متلامستان مع إحداهما الأخرى: وهذا «التلامس» يكون بنية الفضاء.



الشكل (٦ - ٤): شبكة لف مغزلي.

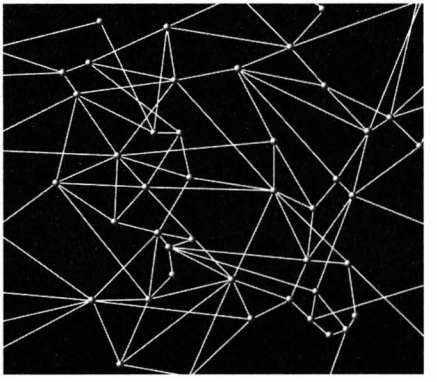
إن كمات الجاذبية ليست «في» الفضاء، «بل هي نفسها الفضاء»، وشبكات اللف المغزلي التي تصف البنية الكمية للمجال الجاذبي ليست مغمورة في الفضاء، فهي لا تسكن الفضاء، إن موقع كمات الفضاء لا يحدد بالنسبة لشيء آخر، بل يحدد فقط بالروابط والعلاقات التي تعبر عنها.

إذا تحركت من حبيبة إلى أخرى على طول الروابط وكونت دائرة مغلقة وعدت مرة أخرى إلى الحبيبة التي بدأت من عندها، فسأكون قد كونت «حلقة»، هذه هي الحلقات الأصلية للنظرية الحلقية، ولقد أوضحت في الفصل الرابع أن انحناء الفضاء يمكن قياسه إذا نظرنا إذا ما كان السهم المنتقل عبر دائرة مغلقة يعود مشيرًا في الاتجاه نفسه أم يعود مقلوبًا، إن رياضيات النظرية تحدد هذا الانحناء لكل دائرة مغلقة في شبكة اللف

المغزلي، وهذا يمكن من تقييم انحناء الزمكان، ومن ثم قوة المجال الجاذبي من بنية شبكة اللف المغزلي.*

إذًا ميكانيكا الكم هي أمر أكبر من الحُبَيْبِيَّة، علاوة على ذلك، فهناك حقيقة أن التطور احتمالي، فطريقة تطور شبكات اللف المغزلي عشوائية، وسأتحدث عن ذلك في الفصل القادم المخصص للزمن.

على مستوى شديد الصغر فإن الفضاء عبارة عن مجموعة متذبذبة من كمات الجاذبية التي تؤثر على بعضها البعض، وتؤثر معًا على الأشياء، وتظهر نفسها في هذه التفاعلات كشبكات لف مغزلي مكونة من حبيبات متداخلة مع بعضها البعض (انظر الشكل (٦ - ٥)).



الشكل (٦ - ٥): على مستوى دقيق لا يبدو الفضاء ممتدًّا، بل عبارة عن نسيج من عناصر محددة مترابطة.

الفضاء المادي هو النسيج الناتج عن هذا التجمع الدائم لشبكة العلاقات، والخطوط نفسها ليست موجودة في أي مكان، فهي ليست في مكان بل تخلق الأماكن من خلال تفاعلاتها، فالفضاء يتكون من خلال تفاعل كمات الجاذبية الفردية.

* المؤثر المرتبط بهندسة الفضاء الحبيبي هو هولونومية وصلات الجاذبية، أو هي «حلقة ويلسون» في النسبية العامة وفقًا للمصطلحات الفيزيائية.

هذه هي الخطوة الأولى نحو فهم الجاذبية الكمية، والخطوة الثانية تخص الزمن، والفصل التالي مخصص لهذا الموضوع.

الفصل السابع

الزمان غير موجود

«يجب ألا يزعم أحد أنه يستطيع أن يشعر بالوقت نفسه بعيدًا عن حركة الأشياء.»

لوكريتيوس «في طبيعة الأشياء».[١]

سيدرك القارئ النبيه أنني أَوْلَيت بعض الاهتمام بالزمن في الفصل السابق، ورغم ذلك فقد أوضح أينشتاين منذ ما يزيد عن قرن أننا يجب ألا نفصل بين الزمان والمكان، وأننا يجب أن نفكر فيهم معًا ككيان واحد هو الزمكان، والآن حان وقت تصحيح ذلك وإعادة الزمان إلى الصورة.

على مدار سنوات دارت أبحاث الجاذبية الكمية حول المعادلات المكانية قبل أن تتحلى بالشجاعة لمواجهة الزمن، وفي الخمس عشرة سنة الأخيرة بدأ في الظهور طريقة للتفكير في الزمان، وسأحاول شرح هذه الطريقة.

بظهور الجاذبية الكمية اختفى من الفيزياء الفضاء كوعاء للأشياء ليس له ملامح محددة، فالأشياء (الكمات) لا تسكن الفضاء، بل تسكن على بعضه البعض، والفضاء هو نسيج علاقاتها المتجاورة، ومثلما تخلينا عن فكرة المكان كوعاء ساكن، يجب بالمثل أن نتخلى عن فكرة الزمان كتدفق ساكن يحدث خلاله الواقع، ومثلما اختفت فكرة الفضاء كتسلسل يضم الأشياء، يجب أيضًا أن تختفي فكرة التسلسل المتدفق «الزمن» الذي تحدث الظواهر على مداره.

وعلى نحو معين، فإن الفضاء لم يعد موجودًا في النظرية الأساسية؛ فكمات المجال الجاذبي ليست «في» الفضاء، وعلى النحو نفسه، فإن الزمان لم يعد موجودًا في النظرية الأساسية؛ فكمات الجاذبية لا تتطور «في» الزمان، فالزمن يعد فقط تفاعلاتها، وكما هو موضح في معادلة ويلر دويت، فإن المعادلات الأساسية لم تعد تضم متغير الزمن، فالزمان — مثل المكان — ينشأ من المجال الجاذبي الكمي.

كان هذا بالفعل صحيحًا جزئيًّا بالنسبة للنسبية العامة الكلاسيكية التي كان يظهر فيها الزمن كسمة من سمات المجال الجاذبي، لكن طالما سنهمل النظرية الكمية، فمن الممكن أن نفكر في الزمكان بطريقة تقليدية نسبيًّا، فنعتبره مثل قماش نجود ترتسم عليه قصة بقية الواقع، حتى وإن كان قماش نجود نشطًا ومتحركًا، وعندما نأخذ ميكانيكا الكم في الاعتبار سندرك أن الزمن أيضًا يجب أن يتسم بصفات اللاتحديد الاحتمالية والحُبَيْبِيَّة والعلائقية الشائعة في كل ما يخص الواقع، وعلى هذا النحو فإنه يصبح «زمنًا» مختلفًا بوضوح عن كل ما عرفناه عن هذه الكلمة حتى اللحظة الراهنة.

إن هذه النتيجة المفاهيمية الثانية لنظرية الجاذبية الكمية أكثر خطورة من اختفاء الفضاء.

لنحاول أن نفهمها.

الزمن ليس كما نعتقد

منذ ما يزيد عن قرن اتضح بالفعل أن طبيعة الزمن مختلفة عن الفكرة الشائعة عنه، لقد أوضحت النسبية الخاصة والنسبية العامة هذا الأمر، واليوم، يمكن إثبات عدم صحة فكرتنا البديهية عن الزمن بسهولة في المختبر.

لنتأمل على سبيل المثال أولى نتائج النسبية العامة الموضحة في الفصل الثالث، خذ ساعتين وتأكد من أنهما تشيران إلى الوقت نفسه

بالضبط، وضع إحداهما على الأرض والأخرى على قطعة أثاث، وانتظر نصف ساعة تقريبًا، ثم أحضر كل منهما بالقرب من الأخرى، فهل ستشير الساعتان إلى الوقت نفسه؟

كما وصفنا في الفصل الثالث فالجواب هو لا، إن الساعات التي نرتديها عادةً على معاصمنا، أو الموجودة على هواتفنا المحمولة ليست دقيقة على النحو الكافي لتسمح لنا بالتأكد من هذه الحقيقة، لكن في مختبرات الفيزياء في كل أنحاء العالم توجد ساعات دقيقة على نحو يسمح بإظهار الاختلاف الذي يحدث؛ فالساعة الموجودة على الأرض تكون أبطأ عند مقارنتها بالساعة الموضوعة فوقها.

لماذا؟ لأن الوقت لا يمر بالطريقة نفسها في كل مكان في العالم، ففي بعض الأماكن يتدفق على نحو أسرع، بينما يتدفق على نحو أبطأ في أماكن أخرى، وكلما اقتربت من الأرض، حيث يوجد جهد الجاذبية الأرضية* ازداد مرور الوقت بطأً، هل تذكر قصة التوأم في الفصل الثالث الذي انتهى بهما الحال بوجود اختلاف عمري نتيجة لعيش أحدهما في مستوى البحر وعيش الآخر في الجبال؟ إن التأثير صغير للغاية، فالوقت المكتسب من الحياة التي قضاها أحدهما بالقرب من البحر مقارنةً بالحياة التي قضاها الآخر في الجبال يتكون من أجزاء من الثانية، لكن صغر المقدار لا يغير حقيقة وجود فارق حقيقي، فالزمن لا يعمل كما نتخيل عادةً.

يجب ألا نفكر في الزمن كما لو كان هناك ساعة كونية هائلة تحدد حياة الكون، لقد عرفنا منذ ما يزيد عن قرن أننا يجب أن نفكر في الزمن باعتباره ظاهرة محلية؛ فكل شيء في الكون له زمنه الخاص الذي يجري بسرعة يحددها المجال الجاذبي المحلي.

ورغم ذلك، فحتى فكرة الزمن المحلي لم تعد نافعة عندما نأخذ في اعتبارنا الطبيعة الكمية للمجال الجاذبي، فلم تعد الأحداث الكمية مرتبة

* جهد الجاذبية الأرضية.

بمرور الوقت على مقياس بلانك، فمن إحدى النواحي، لم يعد الزمن موجودًا.

فما معنى أن الزمن لم يعد موجودًا؟

أولًا: غياب متغير الزمن من المعادلات الأساسية لا يعني أن كل شيء ثابت وأن التغيير لا يحدث، بل على العكس يعني أن التغيير موجود في كل مكان، فالعمليات الأولية فقط هي ما لا يمكن ترتيبها وفقًا لتسلسل شائع من اللحظات، فعلى مقياس كمات الفضاء شديد الصغر، لا يتطور رقص الطبيعة وفقًا لإيقاع عصا مايسترو أوركسترا وحيدة، بل ترقص كل عملية على نحو مستقل عن جيرانها ووفقًا لإيقاعها الخاص، إن مرور الزمن جوهري في العالم، فهو مولود من العالم نفسه، ومن علاقات الأحداث الكمية التي «تكون» العالم والتي تولد بنفسها زمنها الخاص به.

في الحقيقة، عدم وجود الزمن لا يعني أي شيء شديد التعقيد، فلنحاول الفهم.

الشمعدان والنبض

يظهر الزمن في معظم معادلات الفيزياء الكلاسيكية، فهو المتغير الموضح بالحرف t، تخبرنا المعادلات كيف تتغير الأشياء «بمرور» الزمن، فإذا عرفنا ما حدث في الماضي، فإنها تسمح لنا بتوقع المستقبل، وبمزيد من التحديد فإننا نقيس بعض المتغيرات — مثل الموقع A لأحد الأشياء، والزاوية B لبندول متأرجح، والحرارة C لأحد الأشياء — وتخبرنا معادلات الفيزياء كيف ستتغير هذه المتغيرات A, B, C بمرور الزمن، إنها تتوقع الدوال $A(t), B(t), C(t)$ وهكذا التي تصف تغير هذه المتغيرات مع مرور الزمن t.

كان جاليليو أول من يدرك أن حركة الأشياء على الأرض يمكن

وصفها من خلال معادلات لدوال الزمن $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$، وأول من يكتب معادلات واضحة لهذه الدوال، فعلى سبيل المثال، يصف أول قانون للفيزياء الأرضية اكتشفه جاليليو كيف تسقط الأشياء، أي كيف يختلف ارتفاع الشيء x مع مرور الزمن t.*

ولاكتشاف وإثبات هذا القانون احتاج جاليليو إلى نوعين من القياسات، فقد احتاج إلى قياس ارتفاع x الشيء والزمن t؛ ولذلك احتاج بصفة خاصة إلى آلة لقياس الزمن، لقد احتاج إلى «ساعة».

في الزمن الذي عاش فيه جاليليو لم يوجد ساعات دقيقة، واكتشف جاليليو نفسه عندما كان شابًّا حلًّا لصناعة أجهزة قياس وقت دقيقة، لقد اكتشف أن اهتزازات البندول تستغرق كلها الوقت نفسه (بصرف النظر عن السعة)، ومن ثم، فمن الممكن ببساطة قياس الوقت من خلال عد اهتزازات البندول، تبدو فكرة واضحة لكن كان على جاليليو أن يكتشفها؛ فهذه الفكرة لم تخطر على بال أحد قبله، فهذا هو حال العلم.

إلا أن الأشياء ليست في الواقع بهذه المباشرة.

وفقًا للأسطورة، فقد خطرت لجاليليو هذه الفكرة في كاتدرائية بيزا الرائعة أثناء مشاهدة الاهتزازات البطيئة لشمعدان عملاق معلق هناك، (الأسطورة زائفة، نظرًا لأن الشمعدان عُلِّقَ فعليًّا لأول مرة في الكاتدرائية بعد سنوات من وفاة جاليليو، لكن هذه الأسطورة تمثل قصة جيدة، ربما كان هناك شمعدان آخر متدليًا في الكاتدرائية في ذلك الوقت.) كان العالم يراقب الاهتزازات أثناء قداس من الواضح أنه لم يكن مركزًا فيه بشدة، بل كان يقيس مدة كل اهتزازة من اهتزازات الشمعدان من خلال عد دقات نبضه، ومع تصاعد الإثارة اكتشف أن عدد نبضاته متساويًا مع كل اهتزازة، فهو لم يتغير عندما تباطأ الشمعدان واهتز بسعة منخفضة، واستغرقت الاهتزازات كلها المدة نفسها.

* $x(t) = \frac{1}{2} at^2$.

إنها قصة جيدة، لكن عندما نتأملها تتركنا في حيرة، وهذه الحيرة تعود إلى أصل مشكلة الزمن، فكيف استطاع جاليليو أن يعرف أن «نبضاته» استغرقت الفترة نفسها من الزمن؟*

ولم تمر سنوات كثيرة بعد موت جاليليو حتى بدأ الأطباء قياس نبض المرضى باستخدام ساعة لم تكن في نهاية المطاف إلا بندول، إذًا، إننا نستخدم النبضات لنؤكد لأنفسنا أن البندول منتظم، ثم نستخدم البندول لنتأكد من انتظام النبضات ألا يبدو ذلك أشبه بالدوران في دائرة مفرغة؟ فما معنى ذلك؟

هذا يعني أننا في الواقع لا نقيس الزمن نفسه أبدًا؛ بل نقيس دائمًا المتغيرات الفيزيائية A, B, C ... (أي الاهتزازات، النبضات، وغيرها الكثير) ونقارنها بمتغير آخر، أي إننا نقيس الدوال $A(B), B(C), C(A)$، وهكذا يمكننا عد النبضات لكل اهتزازة، وعدد الاهتزازات لكل دقة من دقات ساعة التوقف؛ وعدد دقات ساعة التوقف بين الفواصل الزمنية لساعة برج الجرس ...

الفكرة هي أنه من «المفيد» تخيل وجود المتغير t — «الزمن الحقيقي» — الذي يحدد كل هذه التحركات، حتى ولو لم نستطع قياسه مباشرةً، إننا نكتب معادلات لهذه المتغيرات الفيزيائية بالنسبة للمتغير t «غير القابل للملاحظة»، وهذه المعادلات تخبرنا كيف تتغير الأشياء في الزمن t، أي تخبرنا كم تستغرق كل اهتزازة، وكم تستمر كل خفقة من خفقات القلب، ومن هنا يمكننا أن نستنتج كيف تتغير المتغيرات بالنسبة لبعضها البعض — كم عدد ضربات القلب في الاهتزازة الواحدة — ومقارنة هذا التوقع بما نلاحظه في العالم، وإذا كانت هذه التوقعات صحيحة، يمكننا أن نثق في أن هذه الخطة المعقدة سليمة، وأنه من المفيد تحديدًا استخدام متغير الزمن t حتى وإن كنا غير قادرين على قياسه مباشرةً.

* تحديدًا منذ أن أصابته الإثارة.

وهذا يعني أن وجود متغير الزمن افتراض مفيد وليس نتيجة لملاحظة.

كان نيوتن مَنْ فهم كل هذا؛ حيث أدرك أنها طريقة جيدة للمتابعة، وأوضح هذه الخطة وطورها، وأكد نيوتن بوضوح في كتابه أننا لا يمكننا أبدًا قياس الزمن الحقيقي t، لكننا إذا «افترضنا» وجوده فمن الممكن تكوين إطار فعال لوصف الطبيعة.

بعد أن أوضحنا ذلك يمكننا العودة إلى الجاذبية الكمية، ومعنى جملة أن «الزمن غير موجود»، فهي تعني ببساطة أن خطة نيوتن لم تعد فعالة عند التعامل مع الأمور الصغيرة، لقد كانت جيدة عند التعامل مع الأمور الكبيرة فحسب.

فإذا أردنا أن نفهم العالم على نطاق عريض، وإذا أردنا فهم كيفية عمله في المواقف غير المألوفة التي تلعب فيها الجاذبية الكمية دورًا مهمًّا، فإننا نحتاج إلى التخلي عن هذه الخطة، إن فكرة الزمن t الذي يتدفق من تلقاء نفسه، وتتطور كل الأشياء مع مروره لم تعد فكرة مفيدة، فالعالم لا تصفه معادلات تطور مع مرور الزمن t، وما يجب فعله ببساطة هو أن نعدد المتغيرات $A, B, C, \ldots$ التي نلاحظها «واقعيًّا»، وأن نكتب معادلات تعبر عن العلاقات بين «هذه» المتغيرات، دون أي شيء آخر؛ أي أن نكتب معادلات عن العلاقات $A(B), B(C), C(A) \ldots$ التي نلاحظها، وليس عن الدوال $A(t), B(t), C(t)$ التي «لا» نلاحظها.

في مثال النبض والشمعدان، لن نجد تطور النبض والشمعدان مع مرور الوقت، بل سنجد فقط معادلات تخبرنا كيف يتطور المتغيران بالنسبة لبعضها البعض، أي سنجد معادلات تخبرنا مباشرة عن عدد النبضات الموجودة في الاهتزازة، دون ذكر الزمن t.

«الفيزياء الخالية من الزمن» هي فيزياء نتحدث فيها فقط عن النبض والشمعدان دون ذكر الزمن.

إنه تغير بسيط، لكنه قفزة كبيرة من الناحية المفاهيمية، يجب أن نتعلم ألا نفكر في العالم باعتباره شيء يتغير مع مرور الزمن، بل يجب أن نفكر فيه بطريقة أخرى، فالأشياء تتغير فقط بالنسبة لبعضها البعض، وعلى المستوى الأساسي، لا يوجد زمن، إن إحساسنا بمرور الزمن الشائع ما هو إلا تقريب مشروع فقط على مستوى العالم العياني الذي نراه بالعين المجردة، وهذا الإحساس مكتسب من أننا نرى العالم من المنظور الكبير.

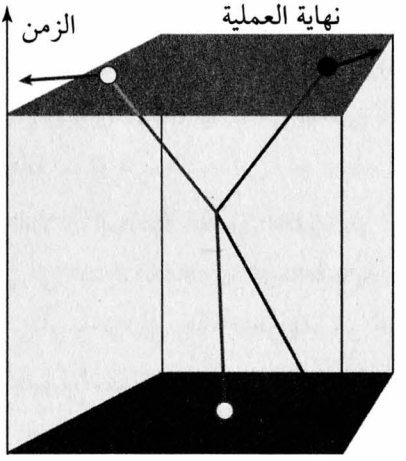
ومن ثم فالعالم الذي تصفه النظرية بعيد عن العالم المألوف بالنسبة لنا، فلم يعد هناك فضاء «يحتوي» العالم، ولم يعد هناك زمن تحدث «على مداره» الأحداث، بل توجد عمليات أولية تتفاعل فيها كمات الفضاء والمادة باستمرار مع بعضها البعض، فمثلما تتكون البركة الألبية الهادئة والصافية من تراقص سريع لعدد هائل من جزيئات الماء، فإن وهم الفضاء والزمان الممتدين المحيطين بنا إنما هو نتيجة لرؤية بعيدة النظر لتجمع كثيف من العمليات الأولية.

سوشي الزمكان

كيف نطبق هذه الأفكار العامة على الجاذبية الكمية؟ كيف يمكننا وصف التغيير دون فكرة الفضاء كوعاء أو فكرة الزمن الذي ينزلق عليه العالم؟

لنتفكر في إحدى العمليات ولتكن اصطدام كرتَي بلياردو على جوخ الطاولة الأخضر، تخيل ضرب كرة حمراء في اتجاه كرة صفراء، وعند اقترابها منها تصطدم بها وتتحرك الكرتان بعيدًا في اتجاهين مختلفين، هذه العملية — مثل كل العمليات — تحدث في منطقة مكانية محددة — لنقُل: طاولة عرضها مترين — وتستمر لمدة زمنية محددة — لنقُلْ ثلاث ثواني — وللتعامل مع هذه العملية في سياق الجاذبية الكمية لا بد من ضم المكان والزمان في العملية نفسها (انظر الشكل (٧ -١)).

وهذا يعني أنه يجب ألا نصف الكرتين فقط، بل أن نصف أيضًا كل ما يحيط بهما، مثل الطاولة وكل الأشياء المادية، والمكان المغمورين فيه أثناء الوقت الذي يمر بين بداية الضربة ونهاية العملية، المكان والزمان هما المجال الجاذبي، هما «حلزون» أينشتاين: إننا نضم أيضًا المجال الجاذبي، أي جزء من الحلزون، في العملية، كل شيء مغمور في حلزون أينشتاين العظيم: في هذا الصدد، تخيل أنك تقطع إلى شرائح قطعة محددة منه على شكل قطعة سوشي تضم الاصطدام وما حوله.



الشكل (٧ - ١): منطقة مكانية تضرب فيها كرة سوداء كرة بيضاء ثابتة وتدفعها ثم ترتد، الصندوق هو منطقة الزمكان، وموضح داخل الصندوق مسارات الكرتين.

ما نحصل عليه هو صندوق زمكان (كما هو موضح في الشكل (٧ -١)): أي جزء محدد من الزمكان أبعاده بضعة أمتار مكعبة في بضعة ثوان من الزمن، «هذه» العملية لا تحدث «في» الزمن، فالصندوق ليس «في» الزمكان، بل «يحتوي» الزمكان، إنها ليست عملية تحدث «في» الزمن، تمامًا

مثلما حبيبات الفضاء ليست «في» الفضاء، إن مرور الزمن ما هو إلا قياس للعملية نفسها، تمامًا مثلما كمات الجاذبية ليست «في» الفضاء بل تكوِّن بنفسها الفضاء.

مفتاح فهم طريقة عمل الجاذبية الكمية تكمن في عدم التفكير في العملية الفيزيائية المتمثلة في الكرتين فقط، وإنما بالتفكير في العملية برمتها الممثلة في الصندوق كله بكل ما يحتويه، بما في ذلك المجال الجاذبي.

دعونا الآن نعود إلى فكرة هايزنبيرج الأصلية التي تقول: إن ميكانيكا الكم لا تخبرنا بما يحدث أثناء العملية، بل تخبرنا عن الاحتمالية التي تربط الحالتين المختلفتين للعملية المتمثلتين في الحالة الأولية والحالة النهائية، وفي حالتنا، فالحالة الأولية والحالة النهائية موضحتين بكل ما يحدث على «حد» صندوق الزمكان.

ما تقدمه لنا معادلات الجاذبية الكمية الحلقية هو الاحتمالية المرتبطة «بحد» محتمل معين من حدود الصندوق، أي احتمالية خروج الكرتين من الصندوق بشكل معين أو بآخر، في حالة دخولهما من اتجاه آخر.

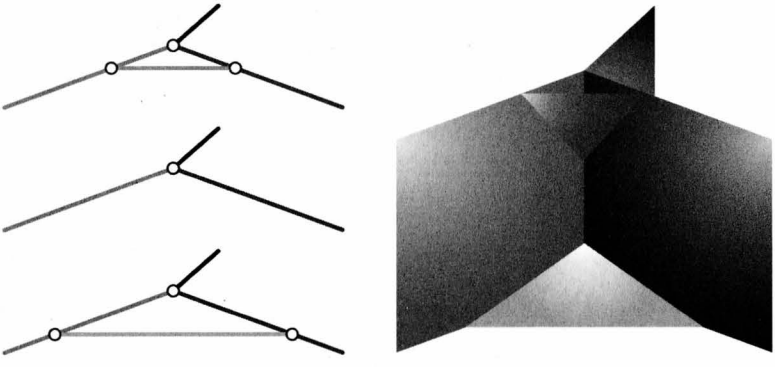
كيف تحسب هذه الاحتمالية؟ تذكر مجموع تكامل مسارات فاينمان التي وصفتها عندما تحدثت عن ميكانيكا الكم، فالاحتمالات في الجاذبية الكمية يمكن حسابها بالطريقة نفسها؛ أي من خلال التفكير في كل «المسارات» المحتملة المشتركة في الحد نفسه، ونظرًا لأننا نطبق كل آليات الزمكان، فهذا يعني التفكير في «كل الزمكانات المحتملة» المشتركة في الحد نفسه مثل الصندوق.

تفترض ميكانيكا الكم أنه بين الحد الأولي الذي يمثل مكان دخول الكرتين، والحد النهائي الذي يمثل مكان خروجهما، لا يوجد زمكان محدد ولا مسار محدد للكرتين، بل يوجد «سحابة» كمية توجد فيها كل الزمكانات المحتملة وكل المسارات المحتملة، ويمكن حساب احتمالية رؤية الكرتين تخرجان من طريق أو من آخر من خلال جمع كل الزمكانات المحتملة.

رغوة اللف المغزلي

إذا كانت بنية «الفضاء» الكمي عبارة عن شبكة لف مغزلي، فكيف ستكون بنية «الزمكان»؟ كيف سيبدو أحد الزمكانات المشار إليها سابقًا في الحساب؟

لا بد أن تكون «تاريخًا» لشبكة اللف المغزلي، تخيل أنك أخذت مخططًا لشبكة اللف المغزلي وحركته، ستجد أن كل عقدة في الشبكة سترسم خطًّا، مثل الكرات في الشكل (٧ -١)، وسيرسم كل خط من المخطط سطحًا وهو يتحرك (فعلى سبيل المثال، سيرسم الجزء المتحرك مستطيلًا)، إلا أن الأمر لا يتوقف عند ذلك، فكل عقدة يمكن أن تنقسم إلى عقدتين أو أكثر مثلما يمكن أن ينقسم الجسيم إلى جسيمين أو أكثر، وبالعكس، يمكن أن تجتمع عقدتان أو أكثر في عقدة واحدة، بهذه الطريقة، فالمخطط المتطور يرسم صورة مثل الصورة الموجودة في الشكل (٧ -٢).



الشكل (٧ - ٢): شبكة لف مغزلي متطورة: تتجمع ثلاث عقد في عقدة واحدة ثم تنفصل مرة أخرى، على اليمين، رغوة لف مغزلي تمثل هذه العملية.

الصورة الظاهرة على يمين الشكل (٧ -٢) هي «رغوة لف مغزلي»، وهي «رغوة»؛ لأنها مكونة من أسطح متقابلة عند الخطوط التي تتقابل

بدورها عند الرؤوس، فتشبه رغوة فقاعات الصابون (انظر الشكل (٧-٣))، ويطلق عليها «رغوة لف مغزلي»؛ لأن وجوه الرغوة تحمل اللفات المغزلية مثلما تفعل روابط المخططات التي تصف تطورها، ولحساب احتمالية إحدى العمليات يجب علينا جمع كل رغوات اللف المغزلي المحتملة داخل الصندوق التي لها الحد نفسه مثل تلك العملية، وحد رغوة اللف المغزلي هو شبكة اللف المغزلي وما تحتويه.

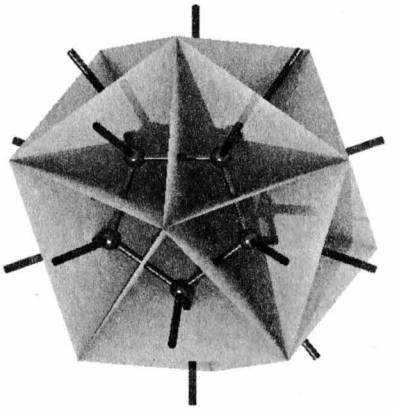
الشكل (٧ - ٣): رغوة فقاعات الصابون.

تعبر معادلات الجاذبية الكمية الحلقية عن احتمالية إحدى العمليات من حيث مجموع رغاوي لف مغزلي ذات حدود معينة، وبهذه الطريقة يكون من الممكن حساب احتمالية أي حدث فيزيائي من الناحية النظرية.*

منذ الوهلة الأولى، تبدو طريقة إجراء الحسابات في الجاذبية الكمية القائمة على رغاوي اللف المغزلي مختلفة جدًّا عن الطرق المعتادة لحساب الأشياء في الفيزياء النظرية، فلا يوجد مكان معين أو زمان معين، وتبدو رغاوي اللف المغزلي أشياء بعيدة نسبيًّا عن جسيمات النموذج المعياري على سبيل المثال، ورغم ذلك، فإنه في حقيقة الأمر توجد أوجه تشابه قوية بين أسلوب رغوة اللف المغزلي وأساليب الحساب المستخدمة في النموذج المعياري، في الحقيقة، يوجد ما هو أكثر من ذلك، حيث إن أسلوب رغوة

* البنية الفعلية لرؤوس رغوة اللف المغزلي أكثر تعقيدًا نسبيًّا من البنية الموضحة في الشكل (٧ -٢)، وتشبه عن كثب تلك البنية الموضحة في الشكل (٧ -٤).

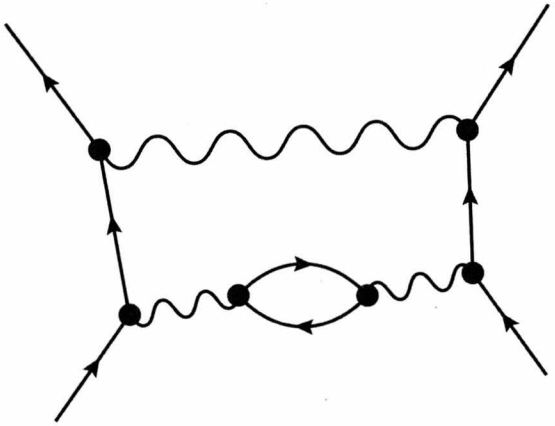
اللف المغزلي يمثل فعليًّا دمجًا جميلًا بين أسلوبي الحساب الرئيسيين المستخدمين في سياق النموذج المعياري، والمتمثلين في مخططات فاينمان والتقريب الشبكي.



الشكل (٧ - ٤): رأس رغوة لف مغزلي، منشورة بإذن من جريج إيجان.

تستخدم مخططات فاينمان — على سبيل المثال — لحساب العمليات التي تسيطر عليها القوى الكهرومغناطيسية أو القوى الضعيفة، ويمثل مخطط فاينمان تسلسل تفاعلات أولية بين الجسيمات، ومثال ذلك في الشكل (٧ -٥) الذي يمثل جسيمين أو كمتين للمجال، أي يمثل تفاعلًا، ينقسم الجسيم الموجود جهة اليسار إلى جسيمين، وينقسم أحدهما بدوره إلى جسيمين يتحدان فيما بعدُ، عند التجمع مع الجسيم الموجود جهة اليمين، يوضح المخطط تاريخ كمَّات المجال.

يستخدم التقريب الشبكي عندما تكون القوى قوية وتكون صورة الجسيم لم تعد فعالة لوصف الفيزياء، مثلًا في حساب القوى القوية بين الكواركات داخل نواة الذرة، يتضمن الأسلوب الشبكي تقريب فضاء فيزيائي ممتد من خلال شبكة كما هو موضح في الشكل (٧ -٦)، ولا يفترض أن تكون هذه الشبكة وصفًا دقيقًا للفضاء، بل أن تكون تقريبية، مثلما يحدث عندما يحسب المهندسون مقاومة أحد الجسور من خلال تقريب الخرسانة بعدد محدد من العناصر، إن هاتين الطريقتين المستخدمتين للحساب — مخططات فاينمان والشبكة — هما أكثر أسلوبين فعالين من أساليب نظرية المجال الكمِّي.



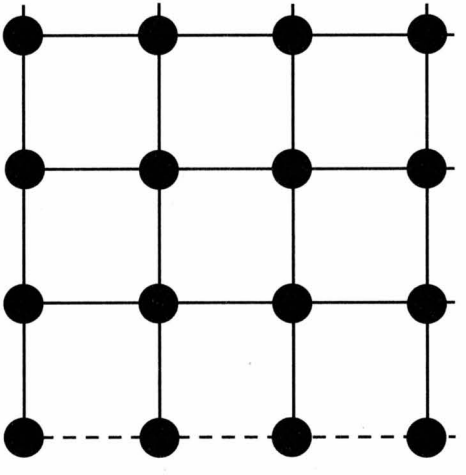
الشكل (٧ - ٥): مخطط فاينمان.

ويحدث أمر جميل في الجاذبية الكمية، حيث تصبح طريقتَي الحساب طريقة واحدة ومتماثلة، إن رغوة الزمكان الممثلة في الشكل (٧-٢) والمستخدمة في حساب العملية الفيزيائية في الجاذبية الكمية يمكن تفسيرها «إما» على أنها مخطط فاينمان «أو» على أنها حساب شبكي؛* ولذلك يتضح أن أسلوبي الحساب المستخدمين للنموذج المعياري هما حالات خاصة لأسلوب شائع هو مجموع «رغاوي اللف المغزلي» للجاذبية الكمية.

عرضت في السابق معادلات أينشتاين، ومرة أخرى لا يمكنني مقاومة ذكر المجموعة الكاملة لمعادلات النظرية الحلقية، وحتى وإن كان القارئ لن يتمكن على نحو واضح من فهمها، إذ لا بد له من دراسة قدر هائل من

* إنها إحدى مخططات فاينمان؛ لأنها تاريخ للكمات كما هو الحال في مخططات فاينمان، الاستثناء الوحيد الآن هو أن الكمات لم تعد كمات متحركة في الفضاء بل كمات «من» الفضاء، والمخطط التي ترسمه في تفاعلاتها لا يمثل حركة جسيمات في الفضاء، بل يمثل مخطط الفضاء نفسه، لكن الصورة الناتجة هي أيضًا شبكة على وجه التحديد تشبه الشبكة المستخدمة في التقريب الشبكي؛ لأنها تمثل زمكان محدد رياضيًا، الأمر المختلف هو أنها لم تعد تقريب، بل أصبحت بنية محددة «حقيقية» للفضاء على مستوى صغير.

الرياضيات ليفهمها، وقد قال أحد الأشخاص ذات مرة: إن النظرية لا يمكن تصديقها إن لم يكن من الممكن تلخيص معادلاتها على تيشيرت، وهذا هو تيشيرت نظرية الجاذبية الكمية الحلقية (انظر الشكل (٧ -٧)).

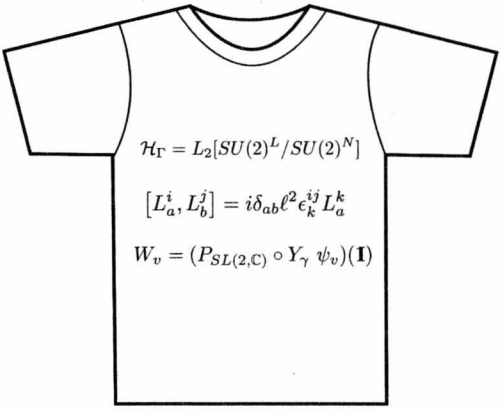


الشكل (٧ - ٦): شبكة تقرب الزمكان الفيزيائي.

هذه المعادلات* هي النسخة الرياضية لصورة العالم التي أوضحتها في الفصلين السابقين، ونحن غير متأكدين تمامًا إذا ما كانت هذه هي المعادلات الصحيحة، لكنها في رأيي أفضل تعبير لدينا في الوقت الراهن عن الجاذبية الكمية.

الفضاء عبارة عن شبكة لف مغزلي تمثل عقدها حبيباتها الأولية، وتمثل روابطها علاقات الجوار، يتولد الزمكان من خلال عمليات تتحول فيها شبكات اللف المغزلي إلى بعضها البعض، وتوصف هذه العمليات من خلال مجموع رغاوي اللف المغزلي، تمثل رغوة اللف المغزلي تاريخ شبكة لف مغزلي، ومن ثم زمكان حُبَيْبِي تتجمع فيه العقد وتفترق.

* تصف المعادلة الأولى فضاء هيلبرت في النظرية، وتصف الثانية جبر المؤثرات، وتصف الثالثة حجم انتقال كل رأس مثل الموضحة في الشكل (٧-٤).



الشكل (٧ - ٧): معادلات الجاذبية الكمية الحلقية ملخصة على تيشيرت.

إن هذا التجمع المجهري للكمات الذي يولد المكان والزمان، هو أساس المظهر الهادئ للواقع العياني المحيط بنا، فكل سنتيمتر مكعب في الفضاء، وكل ثانية تمر، هو نتيجة لهذه الرغوة الراقصة ذات الكمات شديدة الصغر.

مم يتكون العالم؟

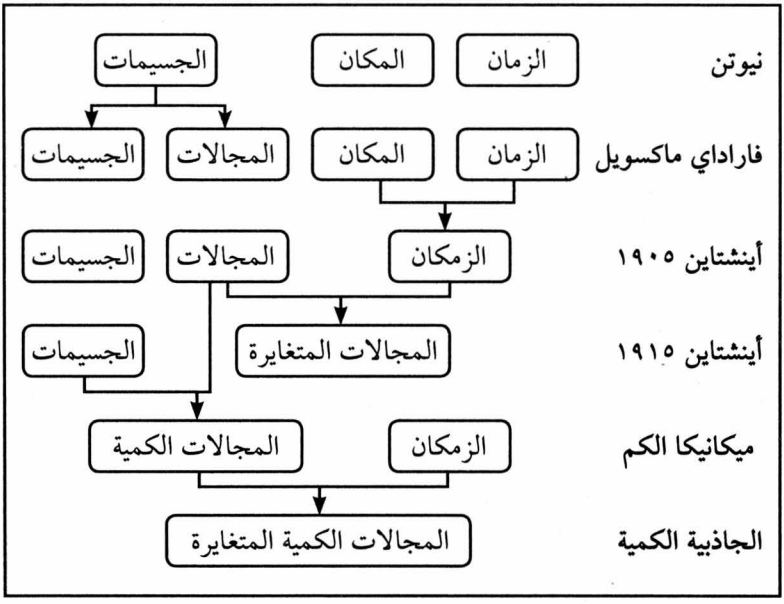
اختفت خلفية الفضاء، واختفى الزمان، واختفت الجسيمات الكلاسيكية بالإضافة إلى المجالات الكلاسيكية، إذًا، فمم يتكون العالم؟

أصبح الجواب بسيطًا الآن؛ فالجسيمات عبارة عن كمات مجالات كمية؛ فالضوء مكون من كمات مجال؛ والفضاء ليس سوى مجال، وهذا المجال يتكون أيضًا من كمات؛ والزمن ينبث من عمليات هذا المجال نفسه، وهذا يعني أن العالم مكون بالكامل من مجالات كمية (انظر الشكل ٧-٨).

وهذه المجالات لا تسكن «في» الزمكان؛ بل تعيش — إن جاز

التعبير — فوق بعضها البعض؛ أي مجالات فوق مجالات، والمكان والزمان اللذان نراهما على المستوى الكبير هما الصورة الضبابية والتقريبية لأحد هذه المجالات الكمية، وهو المجال الجاذبي.

أما المجالات التي لا تسكن على بعضها البعض، وتعيش دون حاجة إلى زمكان يعمل كأساس ودعامة، والقادرة بنفسها على توليد الزمكان، فيُطْلَق عليها «المجالات الكمية المتغايرة»، إن الجوهر الذي يتكون منه العالم أصبح مبسطًا تمامًا في السنوات الأخيرة، فالعالم والجسيمات والضوء والطاقة والفضاء والمكان؛ كل هذا ليس إلا تجليًا لنوع واحد من الكيانات ألا وهو المجالات الكمية المتغايرة.



الشكل (٧ - ٨): مم يتكون العالم؟ يتكون من مكون واحد فقط ألا وهو: المجالات الكمية المتغايرة.

أصبحت المجالات الكمية المتغايرة هي أفضل وصف لدينا اليوم عن «الأبيرون»، ذلك الجوهر الأولي الذي يتكون منه كل شيء حسب

افتراض الرجل الذي يمكن أن نطلق عليه أول عالم وأول فيلسوف، ألا وهو أناكسيماندر.*

اختفى الفرق بين الفضاء المنحني والفضاء الممتد في نسبية أينشتاين العامة والكمات المحددة التي تسكن الفضاء المسطح والموحد في ميكانيكا الكم، فالتناقض الواضح بينهما لم يعد موجودًا، فالعلاقة الموجودة بين تسلسل الزمكان وكمات الفضاء هي نفسها العلاقة الموجودة بين الموجات الكهرومغناطيسية والفوتونات، فالفوتونات هي طريقة تفاعل الموجات، والفضاء الممتد والزمان هما نسخة كبيرة تقريبية لكمات الجاذبية الديناميكية، إن كمات الجاذبية هي الطريقة التي يتفاعل بها المكان والزمان، والرياضيات نفسها تصف بترابط مجال الجاذبية الكمي مثلما تصف بقية المجالات الكمية الأخرى.

الثمن المفاهيمي المدفوع هو التخلي عن فكرة المكان والزمان كبنيتين عامتين تحتويان العالم، فالمكان والزمان ما هما إلا تقريب يظهر على المستوى الكبير، ولعل كانط كان محقًّا عندما أكد أن موضوع المعرفة والشيء المعروف لا يمكن الفصل بينهما، لكنه كان مخطئًا بالتأكيد عندما اعتبر أن المكان والزمان في تعريف نيوتن شكلين مُسَلَّم بهما من أشكال المعرفة، وجزأين من قاعدة لا غنى عنها لفهم العالم، ولقد تطورت هذه القاعدة، وما زالت في طور التطور مع نمو معرفتنا.

في النهاية، نجد أن النسبية العامة وميكانيكا الكم ليستا غير متوافقتين كما كان يبدو، فعند الفحص عن قرب نجد أنهما يتصافحان ويتشاركان في حوار جميل، فالعلاقات المكانية التي تنسج فضاء أينشتاين المنحني

* [...] كل الجسيمات الأولية المختلفة يمكن تقليلها إلى جوهر عالمي واحد يمكن أن يطلق عليه طاقة أو مادة على حد سواء، ويجب عدم تمييز أي من الجسيمات أو اعتباره أكثر أساسية، تتفق وجهة النظر تلك مع معتقد أناكسيماندر، وأنا أعتقد أن هذه هي وجهة النظر الصحيحة في الفيزياء الحديثة، فيرنر هايزنبيرج من كتاب «الفيزياء والفلسفة»: ثورة في العلم الحديث (نيويورك، هاربر آند رو، ١٩٦٢).

هي نفسها التفاعلات التي تنسج العلاقات بين أنظمة ميكانيكا الكم، كلتا النظريتين تصبحان متوافقتين ومترابطتين ووجهين لعملة واحدة بمجرد أن ندرك أن المكان والزمان عنصرين من عناصر أحد المجالات الكمية، وأن المجالات الكمية يمكن أن توجد دون أن تكون مرتكزة في فضاء خارجي.

إن هذه الصورة الحصرية للبنية الأساسية للعالم المادي هي نسخة الواقع التي تقدمها لنا الجاذبية الكمية في الوقت الحاضر.

وكما سنرى في الفصل القادم، فإن المكافأة الأساسية المكتسبة من هذا النوع من الفيزياء هو اختفاء اللانهائية، فتناهي الصغر لم يعد موجودًا، فالآن اختفت اللانهائيات التي شابت نظرية المجال الكمي التقليدية، والمتوقعة على أساس فكرة الفضاء الممتد؛ لأنها نشأت بالضبط عن فرضية الفضاء الممتد، وهذه الفرضية غير صحيحة من الناحية الفيزيائية، بالإضافة إلى ذلك، اختفت التفردات التي تجعل معادلات أينشتاين سخيفة عندما يصبح المجال الجاذبي شديد القوة، فهي لم تكون إلا نتيجة لإهمال تكمية المجال، وتدريجيًا، تجد قطع الأحجية مكانها الصحيح، وفي الأقسام الأخيرة من هذا الكتاب سأصف بعض النتائج الفيزيائية لهذه النظرية،

قد يبدو غريبًا وصعبًا عدم التفكير في الأجرام الأساسية من منظور الزمان والمكان، واعتقاد أنها تنسج الزمان والمكان من خلال علاقاتها، فإلى أي مدى كان غريبًا حتمًا سماع أناكسيماندر وهو يزعم أن تحت أقدامنا ليس سوى السماء نفسها التي نستطيع رؤيتها فوق رؤوسنا؟ أو كم كان غريبًا الاستماع إلى أرسطرخس عندما حاول أن يقيس من الأرض بعد القمر والشمس واكتشف أنهما بعيدان للغاية، ومن ثم لا يمكن أن يكونا في حجم كرتين صغيرتين، بل أنهما عملاقان، وأن الشمس حجمها هائل عند مقارنتها بالأرض، أو كم كان غريبًا الاستماع إلى هابل عندما أدرك أن السحب الصغيرة الشفافة الموجودة بين النجوم عبارة عن بحار شاسعة من النجوم شديدة البعد ...

على مدار قرون استمر العالم في التغير والتمدد من حولنا، وكلما اتسعت رؤيتنا، فهمناه على نحو أفضل، واندهشنا من تنوعه، ومن أوجه قصور التصورات التي كانت لدينا عن العالم، لقد أصبح الوصف الذي تمكنا من صياغته لتفسير العالم حصريًّا على نحو متزايد، ورغم ذلك فإنه بسيط.

إننا نشبه حيوانات الخلد الصغيرة العمياء الموجودة تحت الأرض التي لا تعلم إلا القليل عن العالم أو لا تعلم شيئًا، لكننا مستمرون في التعلم ...

عندما تُرْوَى كل قصص الليلة البارحة
وتبدو كل التصورات متماثلة
فإنها تشير إلى كونها ليست خيالات
بل تصبح أمرًا شديد المصداقية
وإن كان غريبًا ومثيرًا للإعجاب.[٢]

الجزء الرابع
ما وراء المكان والزمان

لقد أوضحت أساس الجاذبية الكمية، وصورة العالم الصادرة عن هذه النظرية، وفي الفصول الأخيرة سأصف بعض نتائج النظرية، مثل الأمور التي تخبرنا بها النظرية عن ظواهر مثل الانفجار العظيم «البيج بانج» والثقوب السوداء، وسوف أناقش أيضًا الحالة الحالية للتجارب الممكنة لاختبار النظرية، والأمور التي تخبرنا بها الطبيعة حسبما يبدو لي، لا سيما في ظل العجز عن رصد الجسيمات فائقة التناظر كما هو متوقع.

وأختتم ببعض الأفكار حول الأمور التي ما زالت ناقصة في فهمنا للعالم، وبصفة خاصة الديناميكا الحرارية، ودور المعلومات في نظرية خالية من الزمان والمكان مثل نظرية الجاذبية الكمية، وظهور الزمان مرة أخرى.

كل هذا يأخذنا إلى حافة ما نعرفه، إلى النقطة التي نشاهد منها ما لا نعرفه بالتأكيد، إلى اللغز الهائل الذي يحيط بنا.

الفصل الثامن

ما وراء البيج بانج

المعلم

عام ١٩٢٧ درس معادلات أينشتاين عالم شاب بلجيكي كان كاهنًا تلقى تعليمه على يد اليسوعيين، وأدرك — مثلما أدرك أينشتاين — أن المعادلات تتوقع ضرورة تمدد الكون أو تقلصه، وبدلًا من رفض النتيجة بحماقة ومحاولة تجنبها بعناد كما فعل أينشتاين، صدق الكاهن البلجيكي النتيجة وبحث عن بيانات فلكية لاختبارها.

في ذلك الوقت، لم تكن المجرات اسمها مجرات، بل كان يُطلق عليها سدم؛ لأنها عند رؤيتها عبر التليسكوب كانت تبدو مثل غيوم صغيرة براقة بين النجوم، لم يكن معروفًا بعدُ أنها جزر هائلة من النجوم البعيدة مثل مجرتنا، ورغم ذلك، فقد فهم الكاهن البلجيكي أن هذه البيانات القليلة المتاحة عن المجرات كانت متوافقة بالفعل مع احتمالية تمدد الكون؛ فالمجرات القريبة تتحرك بعيدًا بسرعة هائلة، كما لو كانت قد أطلقت في السماء؛ والمجرات البعيدة تتحرك بعيدًا بسرعة أكبر، فالكون ينتفخ مثل البالون.

بعد عامين تأكدت هذه الفكرة بفضل اثنين من علماء الفلك الأمريكيين، وهما: هينريتا ليفيت وإدوين هابل، اكتشفت ليفيت طريقة جيدة لقياس مسافة السدم، مما أكد أن السدم بعيدة جدًّا وتقع خارج مجرتنا، وباستخدام

الشكل (٨ - ١) هينريتا ليفيت.

هذه الطريقة وباستخدام التليسكوب الكبير الموجود في مرصد بالومار، جمع هابل بيانات دقيقة تؤكد أن المجرات تتحرك بعيدًا بسرعة متناسبة مع بُعْدها.

إلا أن الكاهن البلجيكي الصغير هو من فهم فعليًّا عام ١٩٢٧ النتيجة الحتمية لذلك؛ حيث إننا إذا رأينا حجرًا يرتفع لأعلى فهذا معناه أن الحجر كان في الأسفل سابقًا ودفعه شيء ما لأعلى، وإذا رأينا المجرات تتحرك بعيدًا، ورأينا الكون يتمدد، فهذا يعني أن المجرات كانت في السابق أكثر قربًا وأن الكون كان أصغر، وأن شيئًا ما دفع الكون إلى البدء في التمدد، ورأي الكاهن البلجيكي الشاب أن الكون كان في الأصل شديد الصغر ومضغوطًا، وأنه بدأ التمدد في انفجار عظيم، وأطلق على هذه المرحلة المبدئية الذرة الأولية، أما اليوم فتُعْرَف باسم «البيج بانج» وتعني الانفجار العظيم.

كان اسم هذا الشاب جورج لومتر، وبالفرنسية يعني اسمه «المعلم»، وثمة بعض أسماء أخرى تناسب على نحو أفضل أول شخص فهم وجود انفجار البيج بانج العظيم، وعلى الرغم من هذا الاسم، فإن شخصية لومتر كانت متحفظة، فقد تجنب الجدل، ولم يزعم مطلقًا الأسبقية في اكتشاف انفجار الكون الذي نُسِبَ في النهاية إلى هابل، ويوضح موقفان من حياته هذا الذكاء العميق، ويتعلق الموقف الأول بأينشتاين، والموقف الثاني متعلق بالبابا.

كما ذكرنا فقد كان أينشتاين متشككًا في تمدد الكون، لقد نشأ وهو يعتقد أن الكون ثابت، ولم يكن قادرًا على قبول فكرة أن الأمر لم يكن كذلك، وهكذا، فإن أعظم الناس يرتكبون الأخطاء ويقعون فريسة للأفكار

الشكل (٨ - ٢): جورج لومتر، الحقوق محفوظة لسجلات جورج لومتر، لوفان.

سالفة التصور، قابل لومتر أينشتاين وحاول إثناءه عن رؤيته المتحيزة، وقاوم أينشتاين لومتر لدرجة أنه أجابه قائلًا: «الحسابات صحيحة والفيزياء سيئة.» لاحقًا، اضطر أينشتاين للاعتراف بأن لومتر كان الشخص الوحيد المحق فعلًا، فليس أي شخص يستطيع أن يثبت خطأ أينشتاين.

حدث الأمر نفسه مرة أخرى، فلقد كان أينشتاين قد قدم الثابت الكوني، وهو تعديل صغير ومهم لمعادلاته وصفته في الفصل الثالث، وكان يأمل (مخطئًا) أن يجعل هذا الثابت المعادلات متوافقة مع فكرته عن الكون الثابت، وعندما اضطر إلى الاعتراف بأن الكون ليس ثابتًا، انقلب على الثابت الكوني، وحاول لومتر للمرة الثانية إقناعه بعدم تغيير رأيه، فالثابت الكوني لا يجعل الكون ثابتًا بل كان صحيحًا وليس هناك سبب وجيه للتخلص منه، في هذا الموقف أيضًا كان لومتر محقًّا؛ فالثابت الكوني يخلق تسارعًا لتمدد الكون، وهذا التسارع قِيس مؤخرًا، ومرة أخرى، كان أينشتاين مخطئًا وكان لومتر محقًّا.

عندما بدأ قبول فكرة نشأة الكون عن انفجار البيج بانج، أعلن البابا بيوس الثاني عشر في خطاب عام (في ٢٢ نوفمبر عام ١٩٥١) أن النظرية تؤكد رواية الخلق المذكورة في سِفْر التكوين،[١] وساور لومتر قلقًا شديدًا تجاه هذا الموقف الباباوي، وتواصل مع المستشار العلمي للبابا، وبذل جهدًا مضنيًا في إقناع البابا بالعدول عن الإشارة إلى وجود صلات بين الخلق الإلهي وانفجار البيج بانج، لقد كان لومتر مقتنعًا بأنه من الحماقة

خلط العلم بالدين بهذه الطريقة؛ إذ كان يرى أن الكتاب المقدس لا يعرف شيئًا عن الفيزياء، والفيزياء لا تعرف شيئًا عن الرب،[٢] وسمح البابا بيوس الثاني عشر لنفسه بالاقتناع، ولم يصدر بعد ذلك عن الكنيسة الكاثوليكية أي تلميح علني عن هذا الموضوع، وكما ترون، فليس أي شخص يستطيع أن يثبت خطأ البابا.

وبالطبع كان لومتر محقًّا أيضًا في هذا الموقف، فاليوم يوجد كلام كثير متعلق باحتمالية كون البيج بانج ليس البداية الحقيقية، وأنه محتمل وجود كون آخر قبل هذا الانفجار، فتخيل كيف كان سيكون موقف الكنيسة الكاثوليكية محرجًا اليوم لو لم يمنع لومتر البابا من إعلان أن انفجار البيج بانج وقصة الخلق أمر واحد وجعله معتقدًا رسميًّا، فقد كان سيلزم تغيير آية «ليكن نور» من أجل «إعادة تشغيل النور مرة أخرى!»

إن معارضة كلٍّ من أينشتاين والبابا، وإقناع كل منهما بأنه مخطئ، وملازمة الصواب في كلتا الحالتين، لهو أمر له نتيجة بالتأكيد، لقد استحق «المعلم» لقبه عن جدارة.

اليوم تكثر التأكيدات القائلة: إن الكون في الماضي السحيق كان شديد السخونة ومنضغطًا بشدة، وأنه تمدد منذ ذلك الحين، ويمكننا بالتفصيل أن نعيد تركيب تاريخ الكون، بدايةً من هذه الحالة الأولية المتسمة بالسخونة والانضغاط، إننا نعلم كيف تكونت الذرات والعناصر والمجرات والنجوم، وكيف تطور الكون كما نراه اليوم، ومرة أخرى، فإن المشاهدات المطولة الحديثة للإشعاع الذي يملأ الكون، والتي صورها في الأساس القمر الصناعي بلانك، أكدت كليًّا نظرية البيج بانج، إننا نعلم بقدر معقول من التأكد ما حدث للكون على المستوى الكبير على مدار الفترة الأخيرة المقدرة بنحو ١٤ مليار سنة، منذ أن كان كرة نار.

وعلى الرغم من أن جملة «نظرية الانفجار العظيم «البيج بانج»» صاغها في البداية معارضو النظرية للسخرية من هذه الفكرة التي بَدَتْ

غريبة، فإننا في النهاية اقتنعنا جميعًا أنه منذ ١٤ مليار سنة كان الكون عبارة عن كرة نار مضغوطة.

لكن ماذا حدث «قبل» هذه المرحلة الأولية المتمثلة في الكرة الساخنة المضغوطة؟

إذا عدنا بالزمن إلى الوراء، فسوف تزداد الحرارة كما تزداد كثافة المادة والطاقة، وعند نقطة معينة سوف يصلون إلى مقياس بلانك، وهذه النقطة هي منذ ١٤ مليار سنة، وعند تلك النقطة لن تصبح معادلات النسبية العامة صحيحة؛ لأنه لن يكون ممكنًا تجاهل ميكانيكا الكم؛ لأننا سندخل في نطاق الجاذبية الكمية.

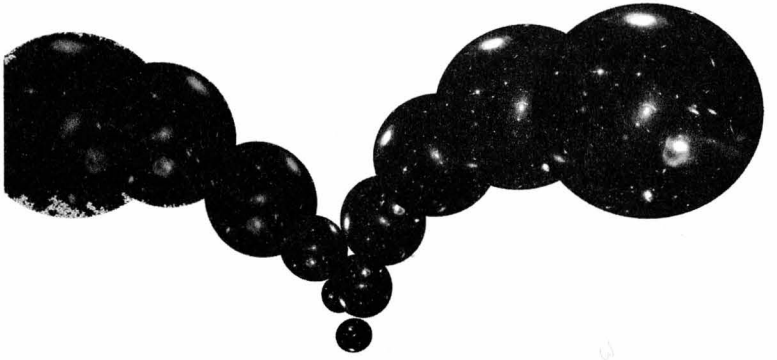
علم الكون الكمي

لكي نفهم ما حدث قبل ١٤ مليار سنة نحتاج إلى الجاذبية الكمية، فماذا تخبرنا الحلقات عن هذا الأمر؟

لنفكر في موقف مشابه لكنه أكثر بساطة، وفقًا للميكانيكا التقليدية، فإن الإليكترون الساقط مباشرة نحو نواة الذرة سوف تبتلعه النواة ويختفي، إلا أن هذا لا يحدث في الواقع، إن الميكانيكا التقليدية غير كاملة، ومن الضروري أن نأخذ في الاعتبار الآثار الكمية، فالإليكترون الحقيقي عبارة عن شيء كمي ولا يتبع مسارًا دقيقًا، حيث من غير الممكن إبقاؤه داخل منطقة شديدة الصغر، وكلما زاد تركيزه، انزلق بعيدًا بسرعة، وإذا أردنا إيقافه حول النواة، فسيكون أقصى ما في وسعنا فعله هو إبقاؤه في مدار في حجم أصغر مدار ذري، ولن يتمكن من البقاء قريبًا من النواة، إن ميكانيكا الكم تمنح الإليكترون الحقيقي من السقوط في النواة، إن الطرد الكمي يدفع الإليكترون بعيدًا عندما يزداد اقترابًا من المركز، وبهذه الطريقة، تتسم المادة بالثبات بفضل ميكانيكا الكم، وبدون ميكانيكا الكم، فسوف تسقط الإليكترونات في الأنوية، ولن توجد ذرات، ولن نوجد.

الأمر نفسه ينطبق على الكون، دعونا نتخيل كونًا يتقلص ويصبح شديد الصغر، وينسحق بفعل وزنه، وفقًا لمعادلات أينشتاين، فإن هذا الكون سوف ينسحق إلى ما لا نهاية وسوف يختفي تمامًا عند نقطة معينة، مثل الإليكترون الساقط في النواة، هذا هو انفجار البيج بانج الذي توقعته معادلات أينشتاين، في حالة تجاهل النظرية الكمية.

أما إذا أخذنا ميكانيكا الكم في الاعتبار، فلن يتمكن الكون من الانسحاق إلى ما لا نهاية، فالطرد الكمي سيجعله يرتد، إن الكون المتقلص لن ينهار عند نقطة، بل سيرتد مرة أخرى ويبدأ في التمدد، كما لو كان ناشئًا عن انفجار كوني (انظر الشكل (٨ -٣)).



الشكل (٨ - ٣): الارتداد الكبير للكون في تمثيل تخطيطي رسمته فرانشيسكا فيدوتو العالمة الإيطالية التي كانت أول من يستخدم رغاوي اللف المغزلي في حساب احتمالية هذه العملية.

لذلك من الممكن أن يكون ماضي الكون نتيجة لمثل هذا الارتداد، ارتداد هائل يُعْرَف بالارتداد العظيم بدلًا من الانفجار العظيم، فعلى ما يبدو هذا ما ينشأ عن معادلات الجاذبية الكمية الحلقية عند تطبيقها على تمدد الكون.

ويجب عدم أخذ صورة الارتداد بالمعنى الحرفي، بالعودة إلى مثال

الإليكترون، فسوف نتذكر أننا إذا أردنا وضع الإليكترون قريبًا من الذرة قدر الإمكان، فإن الإليكترون لا يعود جسيمًا، بل يمكننا أن نعتبره منتشرًا في سحابة من الاحتمالات، ولم يعد من المنطقي أن يوجد الإليكترون في مكان محدد، والأمر نفسه ينطبق على الكون، فعند المرور الضروري عبر الارتداد العظيم يجب ألا نفكر في مكان وزمان منفردين وإن كانا حبيبيين، بل يجب أن نفكر فقط في سحابة احتمالات منتشرة يتذبذب فيها الزمان والمكان تذبذبًا شديدًا، وفي الارتداد العظيم يتفتت العالم في سحابة احتمالات منتشرة تستطيع المعادلات وصفها رغم ذلك.

ومن ثم، فمن الممكن أن يكون الكون نتيجة لانهيار كون سابق متقلص مر عبر مرحلة كمية تحلل فيها المكان والزمان إلى احتمالات.

أصبحت كلمة «الكون» غامضة، فإذا كنا بكلمة «الكون» نقصد «كل ما هو موجود»، فإنه بطبيعة الحال لا يمكن أن يوجد كون ثان، إلا أن كلمة «كون» اتخذت معنى آخر في علم الكون، فهي تشير إلى تسلسل الزمكان الذي نراه مباشرةً حولنا، الذي تملأه المجرات التي نراقب هندستها وتاريخها، وفي «هذا» الصدد لا يوجد سبب للتأكد من أن هذا الكون هو الكون الوحيد الموجود، ويمكننا تصور الماضي حتى اللحظة التي صوَّرها جون ويلر بأنها تفتت فيها هذا التسلسل الزمكاني مثل زبد البحر، وتشظى في صورة سحابة احتمالات كمية، ولا يوجد سبب لنبذ احتمالية أنه من غير الممكن أن يوجد وراء هذا الزبد الساخن تسلسل زمكاني آخر شبيه بالتسلسل الزمكاني الذي نراه حولنا.

إن احتمالية عبور الكون بمرحلة الارتداد العظيم، مرورًا من التقلص وصولًا إلى التمدد، يمكن حسابها باستخدام الأساليب الموصوفة في الفصل السابق والمتمثلة في صناديق الزمكان، وتُجْرَى هذه الحسابات باستخدام رغاوي اللف المغزلي التي تربط الكون المتقلص بالكون المتمدد.

كل هذه الأمور ما زالت في مرحلة الاستكشاف، لكن المذهل في هذه

القصة هو أننا اليوم لدينا المعادلات التي نحاول من خلالها وصف هذه الأحداث، لقد بدأنا إلقاء النظرات الأولى الحذرة على ما وراء الانفجار العظيم، وإن كانت هذه النظرات ما زالت نظرية حتى هذه اللحظة.

الفصل التاسع

تأكيدات تجريبية؟

إن جاذبية علم الكون الكمي تتجاوز الاستكشافات النظرية المدهشة لما قد يكون موجودًا وراء انفجار «البيج بانج» العظيم، بل هناك سبب آخر لدراسة تطبيق هذه النظرية على علم الكون، حيث تمنح هذه الدراسة فرصة معرفة إذا ما كانت النظرية صحيحة بالفعل.

العلم فعال لأننا بعد الافتراضات والتفكير، وبعد الأفكار الحدسية والرؤى، وبعد المعادلات والحسابات، يمكننا أن نتأكد من إذا ما كنا قد أصبنا أو أخطأنا؛ فالنظرية تمنحنا توقعات عن أمور لم نلاحظها بعدُ، ويمكننا التأكد مما إذا كانت هذه التوقعات صحيحة أم لا، هذه هي قوة العلم الحقيقية التي ترسي مصداقيته وتجعلنا نصدقه بثقة؛ حيث بإمكاننا التأكد مما إذا كانت النظرية صحيحة أم خاطئة، وهذا ما يميز العلم عن أي نوع آخر من أنواع التفكير التي يكون فيها تحديد الشخص المصيب من الشخص المخطئ مسألة شائكة عادةً، وبلا معنى في بعض الأحيان.

عندما دافع لومتر عن فكرة تمدد الكون، ولم يصدق أينشتاين هذه الفكرة، كان أحدهما مخطئًا والآخر محقًّا، ولم يشفع لأينشتاين كل نتائجه وشهرته ونفوذه في الوسط العلمي، ومرجعيته الهائلة، فلقد أثبتت المشاهدات أنه مخطئ وانتهى الأمر، لقد كان الكاهن البلجيكي المغمور محقًّا؛ ولهذا السبب يتسم التفكير العلمي بالقوة.

ألقى علم اجتماع العلوم الضوء على عملية الفهم العلمي المعقدة، فهذه العملية مثل بقية المساعي الإنسانية الأخرى تعتريها اللامنطقية، وتتداخل

مع لعبة القوة وتتأثر بكل أنواع النفوذ الاجتماعي والثقافي، ورغم كل هذا، وعلى النقيض من مبالغات بعض علماء ما بعد الحداثة ودعاة النسبية الثقافية ومَنْ على شاكلتهم، فلا شيء من هذه الأمور يقلل كفاءة التفكير العلمي العملية والنظرية؛ لأنه في النهاية — وفي أغلب الحالات — من الممكن أن تحدد بوضوح من المصيب ومن المخطئ، وحتى أينشتاين العظيم من الممكن أن يقول (وقد قال بالفعل): «آه ... لقد اقترفت خطأ!» إن العلم هو أفضل استراتيجية يمكن اتباعها إذا كنا نقدر المصداقية.

هذا لا يعني أن العلم هو فن التوقعات القابلة للقياس، وبعض فلاسفة العلم يقوضون العلم على نحو واضح من خلال قَصْره على توقعاته العددية فقط، إنهم يسيئون الفهم؛ لأنهم يخلطون بين الأدوات وبين الأهداف، فالتوقعات الكمية القابلة للإثبات هي أدوات لإثبات صحة الافتراضات، ليس الهدف من البحث العلمي التوصل إلى توقعات فحسب، بل فهم كيف يعمل العالم، وتكوين وتطوير صورة للعالم تكون بمثابة بنية مفاهيمية تمكننا من التفكير فيه، فالعلم قبل أن يكون تقنيًا فهو تصوري.

إن التوقعات القابلة للإثبات هي الأداة المحسنة التي تجعلنا نكتشف خطأنا عندما نسيء فهم أحد الأمور، فالنظرية المفتقرة إلى التأكيد التجريبي هي نظرية لم تجتز الاختبارات بعدُ، والاختبارات لا تنتهي أبدًا، ولا تصبح النظرية مؤكدة بالكامل من خلال تجربة أو تجربتين أو ثلاث تجارب، إنما تكتسب النظرية مصداقيتها تدريجيًّا، مرحلة تلو الأخرى، عندما تتضح صحة توقعاتها، فعلى سبيل المثال، نظرية النسبية العامة ونظرية ميكانيكا الكم — اللتان سببتا الحيرة لكثيرين في بادئ الأمر — اكتسبتا المصداقية تدريجيًّا عندما تأكدت كل توقعاتهما — حتى أكثرها غرابة — تدريجيًّا بفعل التجارب والملاحظات.

من ناحية أخرى، فإن أهمية الدليل التجريبي لا تعني أننا لا نستطيع تحقيق أوجه تقدم بدون بيانات تجريبية جديدة، وغالبًا ما يقال: إن العلم

يخطو خطوات للأمام فقط عندما تتوفر بيانات تجريبية جديدة، ولو كان هذا حقيقيًا لكان الأمل ضعيفًا في التوصل إلى نظرية الجاذبية الكمية قبل قياس شيء جديد، لكن من الواضح أن الأمر ليس هكذا، فأي بيانات جديدة كانت متوفرة لدى كوبرنيكوس؟ لا شيء، لقد كان لديه البيانات نفسها التي كانت موجودة عند بطليموس، ما البيانات الجديدة التي كانت عند نيوتن؟ تقريبًا لم يكن عنده أي بيانات، لقد كانت مكوناته الحقيقية هي قوانين كيبلر ونتائج جاليليو، أي بيانات جديدة كانت عند أينشتاين ليكتشف النسبية العامة؟ لم يكن لديه أي بيانات، لقد كانت مكوناته هي النسبية الخاصة ونظرية نيوتن، ببساطة ليس صحيحًا أن الفيزياء تتقدم فقط عندما يتوفر لديها بيانات جديدة.

ما فعله كوبرنيكوس ونيوتن وأينشتاين وغيرهم الكثيرون هو الاعتماد على النظريات الموجودة مسبقًا التي جمعت المعرفة التجريبية من شتى مجالات الطبيعة، بالإضافة إلى توصلهم لطريقة للجمع بين هذه النظريات وإعادة التفكير فيها لتحسين الصورة العامة.

هذا هو الأساس الذي تعتمد عليه أفضل الأبحاث في الجاذبية الكمية، وكما هو الحال دائمًا في العلوم، فإن أصل المعرفة تجريبي في نهاية المطاف، ورغم ذلك، فإن البيانات التي قامت على أساسها الجاذبية الكمية ليست بتجارب جديدة، إنما هي البنى النظرية التي صاغت بالفعل معرفتنا عن العالم في صور مترابطة جزئيًا فحسب، إن «البيانات التجريبية» للجاذبية الكمية هي النسبية العامة وميكانيكا الكم، وبالاعتماد عليهما وفي محاولة لفهم كيف يمكن تحقيق الترابط في عالم يوجد فيه كل من الكمات والفضاء المنحني، فإننا نحاول التطلع إلى المجهول،

إن النجاح الهائل الذي حققه عمالقة سبقونا في مواقف مشابهة مثل نيوتن وأينشتاين وديراك، يبث فينا التشجيع، إننا لا نزعم أننا في مكانتهم، لكن ما يميزنا هو أننا نجلس على أكتافهم وهذا يمكننا من رؤية أكثر مما رأوه، ولا يسعنا إلا المحاولة بشكل أو بآخر.

يجب أن نفرق بين المؤشرات وبين الأدلة القوية، إن المؤشرات هي ما تجعل شيرلوك هولمز ينطلق في الطريق الصحيح، وتسمح له بحل قضية غامضة، أما الأدلة القوية فهي ما يحتاج إليه القاضي للحكم على المذنب، إن المؤشرات تضعنا على الطريق الصحيح المؤدي إلى النظرية الصحيحة، والأدلة القوية هي ما يسمح لنا بعد ذلك بالوثوق في إذا ما كانت النظرية التي وضعناها جيدة أم لا، بدون مؤشرات سوف نبحث في الاتجاهات الخاطئة، وبدون دليل لن تكون النظرية موثوقة.

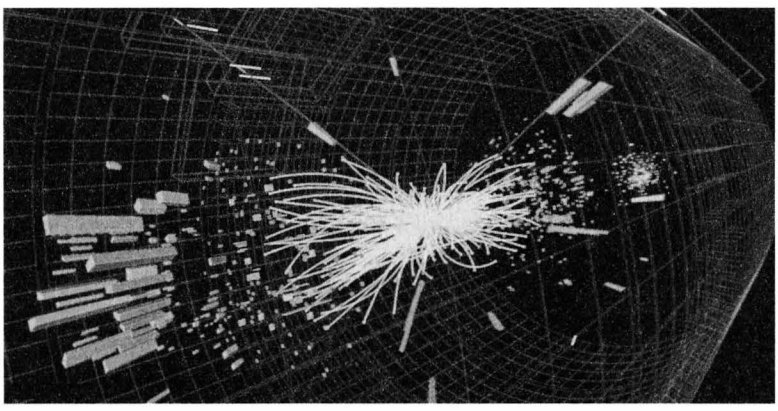
الأمر نفسه ينطبق على الجاذبية الكمية، فالنظرية ما زالت في مهدها، وأدواتها النظرية ما زالت تكتسب الموثوقية، وما زالت أفكارها الأساسية تتضح، فالمؤشرات جيدة وملموسة، والتوقعات المؤكدة ما زالت ناقصة، فالنظرية لم تخضع لاختبارات بعدُ.

إشارات من الطبيعة

تعد النظرية الخيطية أكثر بديل لاتجاه الأبحاث المذكورة في هذا الكتاب خضع للدراسة، وغالبية علماء الفيزياء الذين عملوا على النظرية الخيطية أو على نظريات متعلقة بالنظرية الخيطية، توقعوا أنه بمجرد أن يبدأ في العمل مسارع الجسيمات الجديد في مختبر سيرن في جنيف (مصادم الهادرونات الكبير)، فسوف تتضح على الفور جسيمات من نوع جديد لم تلاحظ من قبل بل توقعتها النظرية، وهذه الجسيمات هي الجسيمات فائقة التناظر، إن النظرية الخيطية تحتاج هذه الجسيمات لتكون مترابطة، ولهذا السبب توقع واضعو النظرية وجود هذه الجسيمات بحماس، من ناحية أخرى، فإن نظرية الجاذبية الكمية الحلقية محددة جيدًا دون هذه الجسيمات فائقة التناظر، لقد كان علماء النظرية الحلقية ميالين إلى التفكير في احتمالية عدم وجود هذه الجسيمات.

ولم تلاحظ هذه الجسيمات فائقة التناظر، مما سبَّب خيبة أمل كبيرة لكثيرين، إن الضجة التي أثيرت احتفالًا باكتشاف بوزون هيجز عام ٢٠١٣ غطَّت خيبة الأمل تلك، فالجسيمات فائقة التناظر ليست موجودة في الطاقة حسبما توقَّع وجودها هناك كثير من علماء النظرية الخيطية، وهذا ليس دليلًا قاطعًا، فهو أبعد ما يكون عن ذلك؛ لكن الطبيعة قدمت لنا مؤشرًا صغيرًا في صالح الحلقات.

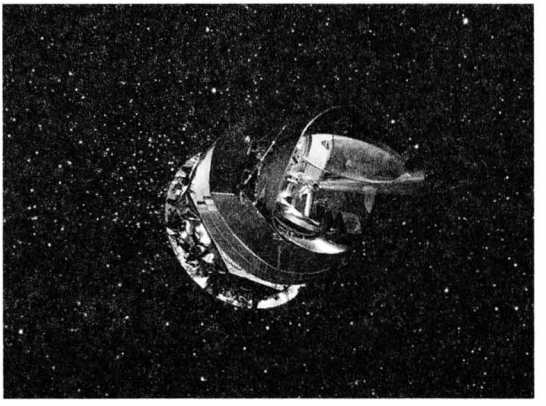
ففي السنوات الأخيرة، وُجِدَت ثلاث نتائج تجريبية بارزة في الفيزياء الأساسية، أول هذه النتائج كان اكتشاف بوزون هيجز في مختبر سيرن في جنيف (انظر الشكل (٩ -١))، النتيجة الثانية هي القياسات التي توصَّل لها القمر الصناعي بلانك (انظر الشكل (٩ -٢))، وقد أعلن عن بيانات هذه القياسات في عام ٢٠١٣ أيضًا، وأكدت هذه القياسات النموذج المعياري الكوني، وثالث هذه النتائج هي أول رصد لموجات الجاذبية، وأعلن عنه في الشهور الأولى من عام ٢٠١٦، هذه هي الإشارات الثلاث التي منحتها لنا الطبيعة مؤخرًا.



الشكل (٩ - ١): حدث في مختبر سيرن يوضح تكون جسيم هيجز.

ثمة أمر مشترك بين هذه النتائج الثلاث ألا وهو غياب عنصر المفاجأة، وهذا لا يقلل من أهمية هذه النتائج بل يزيد من مغزاها، إن اكتشاف بوزون

هيجز لهو تأكيد قوي لصحة الأفكار التي يقوم على أساسها النموذج المعياري للجسيمات الأولية القائم على ميكانيكا الكم، إنه التصديق على توقع حدث منذ ثلاثين عامًا، علاوة على ذلك، فإن قياسات القمر الصناعي بلانك تُعَد تأكيدًا قويًّا للنموذج المعياري الكوني القائم على النسبية العامة مع الثابت الكوني، ورصد موجات الجاذبية يُعَدُّ تأكيدًا مدهشًا لنظرية النسبية العامة التي يبلغ عمرها مائة عام، إن هذه النتائج الثلاث التي تحققت بجهود تقنية مضنية ومن خلال تعاون مكثف بين مئات العلماء لا تفعل شيئًا سوى تأكيد الفهم الموجود لدينا بالفعل عن بنية الكون، فهذه النتائج لا تحتوي على أية مفاجآت حقيقية.



الشكل (٩ - ٢): القمر الصناعي بلانك.

إلا أن غياب المفاجآت كان مفاجأة في حد ذاته؛ لأن كثيرين توقعوا حدوث مفاجأة متمثلة في رؤية «فيزياء جديدة» لم تصفها بعدُ النظريات المعتادة، لقد توقعوا رصد التناظر الفائق في مختبر سيرن وليس بوزون هيجز، وتوقع الكثيرون أن يقيس القمر الصناعي بلانك اختلافات عن النموذج المعياري الكوني، وأن تدعم هذه الاختلافات نظريات كونية بديلة لنظرية النسبية العامة.

لكن لا، فما تؤكده الطبيعة بسيط؛ فهي تؤكد النسبية العامة وميكانيكا الكم والنموذج المعياري داخل ميكانيكا الكم.

كثير من علماء الفيزياء النظرية يبحثون اليوم عن نظريات جديدة من خلال انتقاء افتراضات عشوائية، مثل «دعونا نتخيل أن ...»، ولا أعتقد أن هذا النوع من التفكير العلمي قد أتى بنتائج جيدة، إن خيالنا محدود على نحو يجعلنا عاجزين عن «تخيل» كيف تكوَّن العالم، إلا إذا بحثنا عن الإلهام في الآثار التي نجدها أمامنا، وهذه الآثار المتاحة لنا — أي المؤشرات — تتمثل إما في النظريات التي ثبت نجاحها أو في البيانات التجريبية الجديدة، ولا شيء آخر غير ذلك، وفي ضوء هذه البيانات وهذه النظريات يجب أن نحاول اكتشاف الأمور التي لم نستطع تخيلها بعدُ، فهذه هي الطريقة التي اتبعها كلٌّ من كوبرنيكوس ونيوتن وماكسويل وأينشتاين، فهم لم يحاولوا قط أن «يخمنوا» نظرية جديدة، على النقيض من الطريقة التي يحاول من خلالها كثير من علماء الفيزياء النظرية وضع النظريات في وقتنا الحاضر حسبما أرى.

النتائج التجريبية الثلاثة التي ذكرتها مؤخرًا تتحدث بصوت الطبيعة نفسها فتقول: «كُفُّوا عن الحلم بمجالات جديدة وجسيمات غريبة وأبعاد مكملة وأوجه تشابه أخرى وأكوان موازية وخيوط وغيرها من الأمور، إن قطع الأحجية أكثر بساطة وتتمثل في: النسبية العامة وميكانيكا الكم والنموذج المعياري، والخطوة التالية للأمام قد تكون «فقط» مسألة دمجها بالطريقة الصحيحة، وهذه نصيحة مطمئنة لمجتمع نظرية الجاذبية الكمية الحلقية؛ لأن افتراضات النظرية هي فقط كالتالي: النسبية العامة وميكانيكا الكم والتوافق مع النموذج المعياري، ولا شيء آخر، أما النتائج المفاهيمية الجذرية — المتمثلة في كمات الفضاء واختفاء الزمان — فليست افتراضات جريئة، فهي النتائج العقلانية الناتجة عن التعامل بجدية مع الأفكار الأساسية لأفضل النظريات.

مرة أخرى، نؤكد أن هذه ليست أدلة قاطعة، فالجسيمات فائقة التناظر من الممكن أن توجد في النهاية، ربما على نطاق لم نتوصل له بعدُ، ومن الممكن أن توجد حتى إذا ثبت صحة النظرية الحلقية، لقد فشل التناظر الفائق في الظهور في المكان المتوقع، وأصيب علماء النظرية الخيطية بالحزن، وأصيب علماء النظرية الحلقية بالفرح، لكن المسألة ما زالت مسألة مؤشرات، ولا يوجد دليل قوي على الإطلاق.

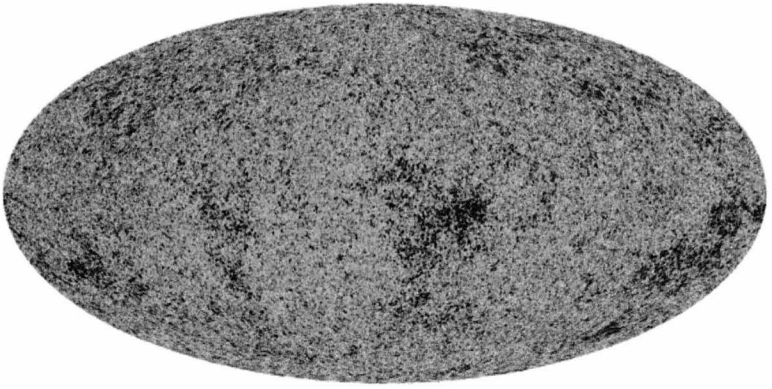
وللعثور على تأكيد ملموس للنظرية نحتاج إلى البحث في مكان آخر، إن الكون البدائي يمكن أن يفتح الباب أمام توقعات قادرة على تأكيد النظرية، ونأمل ألا يكون ذلك في المستقبل البعيد، أو من الممكن أن تثبت هذه التوقعات خطأ النظرية.

نافذة على الجاذبية الكمية

إذا كان لدينا المعادلات التي تصف انتقال الكون عبر المرحلة الكمية، فسوف نستطيع حساب آثار الظواهر الكمية على الكون الذي نراه اليوم، يعج الكون بالإشعاع الكوني، وهو بحر من الفوتونات ظل في الكون منذ المرحلة الساخنة البدائية، فهو الوهج المتبقي من الحرارة العالية البدائية.

المجال الكهرومغناطيسي في الفضاء الشاسع الموجود بين المجرات يرتعش مثل سطح البحر بعد عاصفة كبيرة، ويطلق على هذا الارتعاش المنتشر عبر الكون إشعاع الخلفية الكونية، دُرِسَ هذا الإشعاع في السنوات القليلة الماضية من خلال أقمار صناعية مثل «مستكشف الخلفية الكونية» و« مسبار ويلكينسون لقياس التباين الميكروي»، ومؤخرًا من خلال القمر الصناعي بلانك، ويوضح الشكل (٩ - ٣) صورة للتقلبات الدقيقة لهذا الإشعاع، وتفاصيل بنية هذا الإشعاع تخبرنا عن تاريخ الكون، وفي طيات هذه التفاصيل من الممكن أن توجد آثار البداية الكمية للكون.

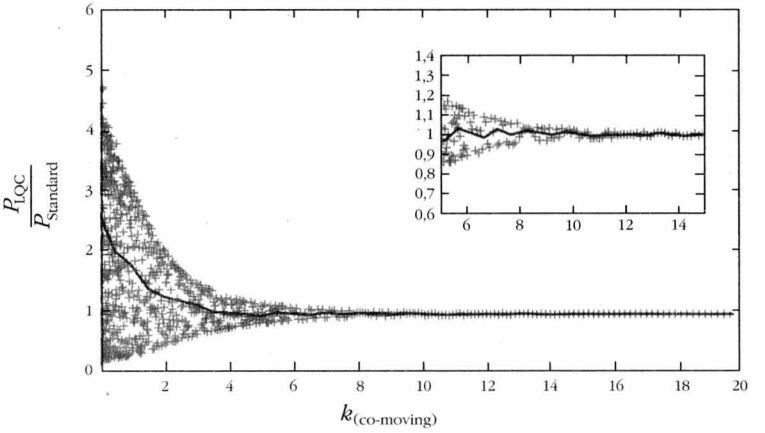
وتُعَد دراسة طريقة انعكاس الدينامية الكمية للكون البدائي في هذه البيانات من أنشط قطاعات البحث في الجاذبية الكمية الحلقية، النتائج أولية لكنها مشجعة، وبمزيد من الحسابات ومقاييس أكثر دقة سيكون ممكنًا الوصول إلى اختبار للنظرية.



الشكل (٩ - ٣): تقلبات إشعاع الخلفية الكونية، هذه صورة أقدم شيء في الكون متاح لنا، صدرت هذه التقلبات منذ ١٤ مليار سنة، ونأمل أن نجد في إحصائيات هذه التقلبات تأكيدًا لتوقعات نظرية الجاذبية الكمية.

عام ٢٠١٣ نشر أبهاي أشتيكار وإيفان أوجويلو ووليام نيلسون مقالة حسبوا فيها أنه في ظل افتراضات معينة، يجب أن يكشف التوزيع الإحصائي لتقلبات مصدر إشعاع الخلفية الكونية تأثير الارتداد المبدئي، أي إن التقلبات واسعة النطاق يجب أن تكون مختلفة عن تلك التي توقعتها النظرية التي لا تأخذ الكمات في اعتبارها، يوضح الشكل (٩ -٤) حالة القياس الحالية، حيث يمثل الخط الأسود توقع كل من أشتيكار وأجويلو ونيلسون، وتمثل النقاط الرمادية البيانات المقاسة، وحتى هذه اللحظة لا يعد هذا كافيًا لتقييم إذا ما كان انحناء الخط الأسود لأعلى الذي توقعه مؤلفو المقالة الثلاث صحيحًا أم لا، ورغم ذلك، فالقياسات تزداد دقة، وما زال الموقف مائعًا،

أما أمثالي من الذين قضوا حياتهم في محاولة فهم أسرار الفضاء الكمي، فيتابعون باهتمام بالغ وبقلق وبأمل التطوير المستمر لقدرتنا على الملاحظة والقياس والحساب، وينتظرون اللحظة التي تخبرنا فيها الطبيعة إذا ما كنا على صواب أم خطأ.



الشكل (٩ - ٤): توقع محتمل لطيف إشعاع الخلفية الكونية في نظرية الجاذبية الكمية الحلقية (موضح بالخط المستقيم) في مقارنة الأخطاء التجريبية الحالية (موضحة بالنقاط)، هذه الصورة منشورة بتصريح من أشتيكار وأجويلو ونيلسون.

يجب أن توجد أيضًا آثار الحرارة البدائية الهائلة في المجال الجاذبي نفسه، والمجال الجاذبي أيضًا — أي الفضاء نفسه — يجب أن يكون مضطربًا مثل سطح البحر؛ لذلك فلا بد من وجود إشعاع خلفية كونية «جاذبية» أيضًا، وأن يكون أقدم من الإشعاع الكهرومغناطيسي؛ لأن أمواج الجاذبية أقل تأثرًا بالاضطراب بفعل المادة مقارنة بالموجات الكهرومغناطيسية، وكانت قادرة على الانتقال دون اضطراب حتى عندما كان الكون سميكًا لدرجة تحول دون السماح بمرور الموجات الكهرومغناطيسية.

لقد لاحظنا حاليًا موجات الجاذبية مباشرةً من خلال مرصد ليجو

(مرصد لموجات الجاذبية بالتداخل الليزري)، المكون من ذراعي رصد يبلغ طولهما بضعة أميال، وموضوعين بزاوية مناسبة لأحدهما الآخر، وتمر فيه أشعة الليزر وتقيس المسافة بين ثلاث نقاط ثابتة، وعندما تمر موجة الجاذبية يطول الفضاء ويقصر على نحو غير محسوس، ويكشف الليزر هذا الاختلاف الضئيل،* وموجات الجاذبية الملحوظة ناتجة عن حدث متعلق بالفيزياء الفلكية، وهو تصادم الثقوب السوداء، وهذه الظواهر تصفها النسبية العامة التي لا تتضمن الجاذبية الكمية، إلا أنه يوجد تجربة أكثر طموحًا يُطْلَق عليها «ليزا» (هوائي مقياس التداخل الليزري الفضائي) في مرحلة التقييم، وهي قادرة على القيام بالأمر نفسه لكن على نطاق أكبر، من خلال وضع ثلاثة أقمار صناعية في مدار لكن ليس حول الأرض إنما حول الشمس، كما لو كانوا كواكب صغيرة تتبع الأرض في مدارها، والأقمار الثلاثة مرتبطة بأشعة ليزر تقيس المسافة بينها، أو على الأحرى تقيس الاختلافات في المسافة عند مرور موجة جاذبية، إذا أطلقت مهمة «ليزا»، فيجب أن تكون قادرة على رؤية موجات الجاذبية الصادرة عن النجوم والثقوب السوداء، وأن ترى أيضًا خلفية انتشار موجات الجاذبية البدائية المتولدة في زمن أقرب للانفجار العظيم المعروف باسم «البيج بانج»، فهذه الموجات يجب أن تخبرنا عن الارتداد الكمي.

يجب أن نكون قادرين على أن نجد في اختلافات الفضاء الدقيقة آثارًا لظواهر حدثت منذ ١٤ مليار سنة، عند نشأة الكون، وأن نؤكد استنتاجاتنا عن طبيعة المكان والزمان.

---

* هذا مقياس تداخل، حيث يستخدم التداخل بين أشعة الليزر الذي يحدث على طول الذراعين ليكشف عن الاختلافات الطفيفة في طول هذين الذراعين.

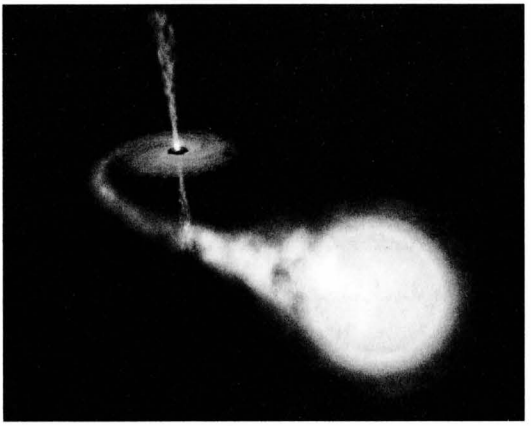
الفصل العاشر

الثقوب السوداء الكمية

مكتبة
t.me/t_pdf

يعج الكون بعدد هائل من الثقوب السوداء، وهي مناطق ينحني فيها الفضاء انحناءً شديدًا لدرجة أنه ينهار على نفسه، ويتوقف الزمان في تلك المناطق، وكما ذكرت، فإن هذه الثقوب السوداء تتكون على سبيل المثال عندما يستهلك النجم كل كمية الهيدروجين المتاحة وينهار.

في الغالب يكون النجم المنهار أحد نجمين متجاورين، وفي هذه الحالة يدور الثقب الأسود والنجم المتبقي حول أحدهما الآخر؛ ويمتص الثقب الأسود المادة من النجم الآخر باستمرار (كما هو موضح في الشكل (١٠ -١)).



الشكل (١٠ - ١): تصور لنجم وثقب أسود. النجم يفقد مادته التي يمتصها الثقب الأسود بالتدريج، ويظهرها على هيئة نافورة تندفع من قطبيه.

ولقد وجد علماء الفلك ثقوبًا سوداء كثيرة في حجم (أي كتلة) الشمس (بل أكبر نسبيًّا في الحقيقة)، ورغم ذلك فإنه يوجد أيضًا ثقوب سوداء عملاقة، ويوجد واحد من هذه الثقوب العملاقة في مركز كل المجرات تقريبًا، بما فيها مجرتنا.

وفي الوقت الحالي يخضع الثقب الأسود الموجود في مركز مجرتنا للدراسة التفصيلية، وفي بعض الأحيان يقترب أحد النجوم بشدة من هذا الوحش، فيتسبب التشوه الناجم عن الجاذبية في تفتته، ويبتلعه الثقب الأسود العملاق مثلما يبتلع الحوت سمكة صغيرة. تخيل وحشًا حجمه يماثل حجم ملايين الشموس يبتلع في لحظة شمسنا وكواكبها الصغيرة ...

هناك مشروع رائع قيد التطوير لتكوين شبكة من الهوائيات اللاسلكية الموزعة عبر الأرض من القطب للقطب، ومن خلالها سيتمكن علماء الفلك من التوصل لدقة كافية «لرؤية» الثقب الأسود المجري، وما نتوقع رؤيته هو قرص أسود صغير يحيط بها الضوء الناتج عن إشعاع المادة الساقطة فيه.

ما يدخل الثقب الأسود لا يخرج منه مرة أخرى، على الأقل إذا أهملنا نظرية الكم، سطح الثقب الأسود يشبه الحاضر، حيث يمكنه عبوره في اتجاه واحد فقط، ولا يوجد عودة من المستقبل، بالنسبة للثقب الأسود، يوجد الماضي في الخارج، والمستقبل في الداخل، وإذا نظرنا للثقب الأسود من الخارج، سنجد أنه يشبه الكرة التي يمكن الدخول إليها لكن لا يمكن أن يخرج منها شيء، يمكن أن يظل الصاروخ موضوعًا على مسافة ثابتة من هذه الكرة، ويطلق على هذه المسافة «أفق» الثقب الأسود، ولفعل ذلك يجب أن تظل محركات الصاروخ مشتعلة بشدة لمقاومة قوة جذب الثقب، وتعني جاذبية الثقب الشديدة أن الزمن يتباطأ بالنسبة للصاروخ، وإذا ظل الصاروخ قريبًا بما يكفي من أفق الثقب لمدة ساعة واحدة ثم ابتعد، فسوف يجد في الخارج — في هذه الأثناء — أن قرونًا من الزمان قد مرت، وكلما ظل الصاروخ أقرب إلى الأفق، مر الوقت أبطأ بالنسبة للصاروخ مقارنةً

بالخارج، ومن ثم، فالسفر إلى الماضي صعب، لكن السفر إلى المستقبل سهل، فكل ما نحتاج إليه هو الاقتراب من ثقب أسود بسفينة فضاء والبقاء بقربه لفترة، ثم الابتعاد.

أما على الأفق نفسه، فالزمن يتوقف؛ فإذا اقتربنا بشدة منه ثم ابتعدنا بعد بضعة دقائق من دقائقنا فستكون قد مرت ملايين السنوات في بقية الكون.

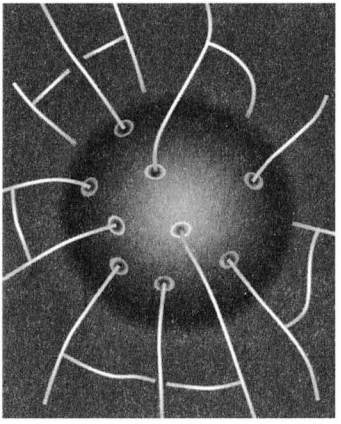
الأمر المفاجئ هو أن صفات هذه الأشياء الغريبة الشائع ملاحظتها في الوقت الحاضر قد «تنبأت» بها نظرية أينشتاين، فالآن يدرس علماء الفلك هذه الأشياء في الفضاء، لكن منذ وقت ليس بطويل كانت الثقوب السوداء تعتبر نتيجة غير معقولة وغريبة لنظرية عجيبة، أذكر أن أستاذي في الجامعة كان يقدمها كحلول لمعادلات أينشتاين، لكنها حلول «من غير المحتمل أبدًا أن تتوافق معها الأشياء الحقيقية»، هذه هي القدرة المدهشة للفيزياء النظرية على اكتشاف الأشياء قبل ملاحظتها.

إن الثقوب السوداء التي نراها وصفتها جيدًا نظرية أينشتاين، ولسنا في حاجة إلى ميكانيكا الكم لفهمها، ورغم ذلك، فثمة لغزين للثقوب السوداء نحتاج ميكانيكا الكم لحلهما، وتقدم النظرية الحلقية حلًّا ممكنًا لكل منهما، وأحد هذين اللغزين يمكن أن يمثل فرصة لاختبار النظرية.

أول تطبيق لنظرية الجاذبية الكمية على الثقوب السوداء يتعلق بحقيقة غريبة اكتشفها ستيفن هوكينج، فقد استنتج نظريًّا في بداية سبعينيات القرن العشرين أن الثقوب السوداء «ساخنة»، فهي تتصرف مثل الأجسام الساخنة، حيث تشع حرارة، وفي هذه الأثناء تفقد الطاقة ومن ثم تفقد الكتلة (لأن الطاقة والكتلة شيء واحد)، وتصبح أصغر على نحو تدريجي، إنها «تتبخر» و«تبخر الثقوب السوداء» هو أهم اكتشافات هوكينج.

تصبح الأشياء ساخنة بسبب حركة مكوناتها المجهرية، فعلى سبيل المثال، قطعة الحديد الساخنة عبارة عن قطعة حديد تهتز ذراتها بسرعة

شديدة حول موضع توازنها، والهواء الساخن عبارة عن هواء تتحرك فيه الجزيئات أسرع من الهواء البارد.



الشكل (١٠ - ٢): سطح ثقب أسود تعبره الحلقات، أي روابط شبكة اللف المغزلي التي تصف حالة المجال الجاذبي، تمثل كل حلقة منطقة كمية على سطح الثقب الأسود، حقوق الصورة محفوظة لجون بايز.

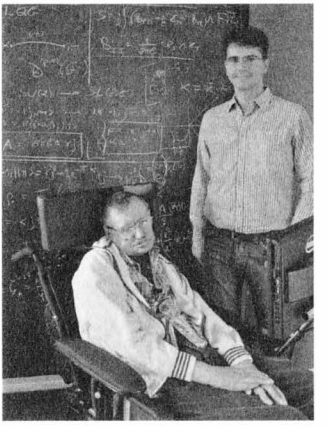
فما هي «الذرات» الأولية المهتزة التي تجعل الثقب الأسود ساخنًا؟ لقد ترك هوكينج هذا السؤال بلا جواب، وتقدم النظرية الحلقية جوابًا محتملًا، إن الذرات الأولية للثقب الأسود التي تهتز — ومن ثم المسئولة عن حرارة الثقب — هي كمات الفضاء الفردية على سطحه.

ومن ثم، فمن الممكن فهم حرارة الثقوب السوداء الغريبة التي توقعها هوكينج من خلال النظرية الحلقية؛ فتكون الحرارة ناتجة عن الاهتزازات المجهرية لذرات الفضاء الفردية، فهي تهتز لأنه في عالم ميكانيكا الكم يهتز «كل شيء»، ولا يظل شيئًا ساكنًا، إن استحالة أن يظل أي شيء ساكنًا في مكانه تمامًا وباستمرار هو صلب ميكانيكا الكم، ترتبط حرارة الثقب الأسود ارتباطًا مباشرًا بتقلبات ذرات الفضاء التي تقول بها نظرية الجاذبية الكمية الحلقية، إن الموقع الدقيق لأفق الثقب الأسود يتحدد فقط في ضوء

التقلبات المجهرية للمجال الجاذبي، ومن ثم — وعلى نحو مؤكد — فإن الأفق يتقلب مثل الجسم الساخن.

هناك طريقة أخرى لفهم أصل حرارة الثقوب السوداء، إن التقلبات الكمية تولد ارتباطًا بين داخل الثقب وخارجه، (سوف أتحدث بالتفصيل عن هذه الارتباطات وعن الحرارة في الفصل الثاني عشر)، إن الريبة الكمية على أفق الثقب الأسود تؤدي إلى تقلبات في هندسة الأفق، إلا أن التقلبات تدل على الاحتمالية، والاحتمالية تدل على الديناميكا الحرارية، ومن ثم الحرارة، ونظرًا لأن الثقب الأسود يخفي عنا جزءًا من الكون، فإنه يظهر تقلباته الكمية في صورة الحرارة.

وأكمل عالم إيطالي شاب يُدْعَى إوجينيو بيانكي أصبح الآن أستاذًا في الولايات المتحدة، حسابًا بسيطًا يوضح كيف يمكن بداية من هذه الأفكار ومن المعادلات الأساسية لنظرية الجاذبية الكمية الحلقية التوصل لصيغة حرارة الثقوب السوداء التي تتوقعها هوكينج (انظر الشكل (١٠ -٣)).



الشكل (١٠ - ٣): ستيفن هوكينج وإوجينيو بيانكي، في الخلفية المعادلات الأساسية لنظرية الجاذبية الكمية الحلقية التي تصف الثقوب السوداء.

يعد التطبيق الثاني لنظرية الجاذبية الكمية الحلقية على فيزياء الثقب الأسود أكثر إدهاشًا، فالنجم بمجرد انهياره يختفي عن المنظور الخارجي، حيث يصبح داخل الثقب الأسود، لكن ماذا يحدث له داخل الثقب؟ ماذا سترى إذا سمحت لنفسك بالسقوط داخل الثقب الأسود؟

في البداية لن ترى شيئًا محددًا، فسوف تعبر سطح الثقب الأسود دون إصابات خطيرة، ثم ستسقط نحو المركز بسرعة أكبر، وماذا بعدُ؟ تتوقع النسبية

العامة انسحاق كل شيء في المركز إلى نقطة صغيرة على نحو لا نهائي وذات كثافة لا نهائية، إلا أننا نؤكد مرة أخرى أن هذا ما سيحدث إذا تجاهلنا النظرية الكمية.

إذا أخذنا الجاذبية الكمية في الاعتبار، فلن يصبح هذا التوقع صحيحًا — حيث يوجد طرد كمي — وهذا الطرد يجعل الكون يرتد في الانفجار العظيم، وما نتوقعه هو أنه عند الاقتراب من المركز تتباطأ المادة الساقطة بفعل هذا الضغط الكمي، لتصل إلى كثافة عالية جدًّا لكنها محددة، المادة تنسحق، لكن ليس وصولًا إلى نقطة صغيرة على نحو لا نهائي؛ لأنه توجد حدود لمدى صغر الأشياء، إن الجاذبية الكمية تولد ضغطًا هائلًا يجعل المادة ترتد للخارج، تمامًا مثلما يمكن للكون الساقط الارتداد للخارج ليصبح كونًا متمددًا.

يمكن أن يكون ارتداد النجم المنهار سريعًا جدًّا عند مشاهدته من أسفل في الداخل، لكن يجب أن نتذكر أن الزمن يمر على نحو أبطأ هنا في الداخل مقارنةً بالخارج، وعند النظر من الخارج، فإن عملية الارتداد ممكن أن تستغرق مليارات السنوات، وبعد هذا الوقت من الممكن أن نرى انفجار الثقب الأسود، في النهاية، هذه ماهية الثقب الأسود في الأساس؛ فهو طريق مختصر إلى المستقبل البعيد.

ومن ثم، فالجاذبية الكمية يمكن أن تعني أن الثقوب السوداء ليست أشياء ثابتة للأبد كما توقعت النسبية العامة الكلاسيكية، فالثقوب السوداء في النهاية ليست ثابتة.

إن رؤية انفجارات الثقوب السوداء يمكن أن يكون تأكيدًا رائعًا للنظرية، فالثقوب السوداء بالغة القدم مثل تلك التي تكونت في الكون البدائي من المحتمل أنها تشهد انفجارات في الوقت الحاضر، وتشير بعض الحسابات الحديثة أن إشارات هذا الانفجار يمكن أن يكون في مدى التلسكوبات الراديوية، علاوة على ذلك، فقد أشير إلى أن بعض النبضات

الراديوية الغامضة التي قاسها «بالفعل» علماء الفلك الراديوي ويُطْلَق عليها التدفقات الراديوية السريعة، من الممكن أن تكون فعليًا إشارات صادرة عن انفجار الثقوب السوداء البدائية، وإذا تأكد ذلك، فسيكون رائعًا؛ حيث سيكون لدينا علامة مباشرة على إحدى ظواهر الجاذبية الكمية، لننتظر وسنرى ماذا سيحدث ...

الفصل الحادي عشر

نهاية اللانهائية

عندما نأخذ الجاذبية الكمية في اعتبارنا فسوف يختفي الضغط اللانهائي للكون إلى نقطة صغيرة على نحو لا نهائي والذي توقعته النسبية العامة في الانفجار العظيم «البيج بانج»، فالجاذبية الكمية هي اكتشاف عدم وجود نقاط صغيرة على نحو لا نهائي، فهناك حد أدنى لقابلية انقسام الفضاء، فمن غير الممكن أن يكون الكون أصغر من مقياس بلانك؛ لأنه لا يوجد شيء أصغر من مقياس بلانك.

إذا تجاهلنا ميكانيكا الكم، فإننا نتجاهل هذا الحد الأدنى، إن المواقف المرضية التي تتوقعها النسبية العامة والتي تقدم فيها النظرية كميات لا نهائية، يطلق عليه تفردات، وتضع الجاذبية الكمية حدًّا لهذه اللانهائية، و«تعالج» التفردات المرضية للنسبية العامة.

الأمر نفسه يحدث في مركز الثقوب السوداء، فالتفرد الذي تتوقعه النسبية العامة الكلاسيكية يختفي بمجرد أن نأخذ الجاذبية الكمية في الاعتبار.

توجد حالة أخرى من نوع مختلف تضع فيها الجاذبية الكمية حدًّا للانهائية، وهذه الحالة متعلقة بقوى مثل الكهرومغناطيسية، إن نظرية المجال الكمي التي بدأها ديراك، وأكملها فاينمان وزملاؤه في خمسينيات القرن العشرين، تصف هذه القوى جيدًا لكنها مليئة باللامنطقيات الرياضية، فعندما نستخدمها لحساب عمليات فيزيائية، فإننا نحصل غالبًا على نتائج لا نهائية

ولا تعني شيئًا، ويطلق على هذه النتائج التباعدات، وهذه التباعدات تقضي عليها لاحقًا الحسابات باستخدام أسلوب تقني معقد يؤدي إلى نتائج نهائية محددة، وهذه الطريقة فعالة عمليًا، وتصبح الأرقام صحيحة في النهاية؛ فهي تقدم مرة أخرى القياسات التجريبية، لكن لماذا يجب أن تتجه النظرية نحو اللانهائي لتصل إلى أرقام معقولة؟

في السنوات الأخيرة من حياة ديراك كان مستاءً للغاية من اللانهائيات في نظريته، وبعد تدبر كل الأمور شعر أن هدفه المتمثل في التوصل لفهم حقيقي لطريقة عمل الأشياء لم يتحقق، لقد أحب ديراك الوضوح المفاهيمي، حتى وإن كان الوضوح من وجهة نظره لم يكن دائمًا وضوحًا بالنسبة للآخرين، ورغم ذلك فاللانهائية لا تؤدي إلى الوضوح.

إلا أن لا نهائيات نظرية المجال الكمِّي نابعة من افتراض أساسي في النظرية ألا وهو قابلية انقسام الفضاء إلى ما لا نهاية، فعلى سبيل المثال، لكي نحسب احتمالات إحدى العمليات، فإننا نجمع — كما علمنا فاينمان — كل الطرق التي من الممكن أن تحدث من خلالها العملية، وهذه الطرق لا نهائية؛ لأنها من الممكن أن تحدث في أي نقطة من النقاط اللانهائية في التسلسل الفضائي؛ ولهذا السبب يمكن أن تكون النتيجة لا نهائية.

عند أخذ الجاذبية الكمِّيَّة في الاعتبار، تختفي هذه اللانهائيات أيضًا، والسبب واضح؛ فالفضاء ليس قابلًا للانقسام على نحو لا نهائي، ولا توجد نقاط لا نهائية، ولا توجد أشياء لا نهائية لنجمعها، إن البنية المحددة الحُبَيْبِيَّة للفضاء تحل صعوبات نظرية المجالات الكمِّيَّة، وتخلصها من اللانهائيات المتفشية فيها.

هذه نتيجة هائلة، فمن ناحية يحل أخذ ميكانيكا الكم في الاعتبار المشاكل المتولدة عن نهائيات نظرية الجاذبية التي قال بها أينشتاين، المتمثلة في التفردات، ومن ناحية أخرى، فإن أخذ الجاذبية في الاعتبار يحل المشاكل المتولد عن نظرية المجال الكمِّي، والمتمثلة في التباعدات،

وعلى الرغم من أن النظريتين بَدَتَا متناقضتين في البداية، فإنهما ليسا كذلك، بل إن كل نظرية تقدم حلًّا للمشاكل الناجمة عن الأخرى!

إن وضع حد للانهائية لهو موضوع متكرر في الفيزياء الحديثة، فمن الممكن تلخيص النسبية الخاصة على أنها اكتشاف وجود سرعة قصوى لكل الأنظمة الفيزيائية، ويمكن تلخيص ميكانيكا الكم على أنها اكتشاف وجود حد أقصى للمعلومات عن كل نظام فيزيائي، والطول الأدنى هو طول بلانك Lp، والسرعة القصوى هي سرعة الضوء c، والمعلومات الكلية يحددها ثابت بلانك h، ويلخص ذلك الجدول (١١ -١).

الكمية الفيزيائية	الثابت الأساسي	النظرية	الاكتشاف
السرعة	c	النسبية الخاصة	وجود سرعة قصوى
المعلومات (الحركات)	$\hbar$	ميكانيكا الكم	وجود حد أدنى للمعلومات
الطول	Lp	الجاذبية الكمية	وجود حد أدنى للطول

الجدول (١١ - ١): الحدود الأساسية التي اكتشفتها الفيزياء النظرية.

إن وجود القيم الدنيا والعليا للطول والسرعة والحركة يضع نظامًا طبيعيًّا للوحدات، فبدلًا من قياس السرعة بالكيلومترات في الساعة، أو بالمترات في الثانية، يمكننا قياسها بأجزاء من سرعة الضوء، ويمكننا تحديد القيمة ١ للسرعة c وكتابة $v = ½$ على سبيل المثال، لجسم يتحرك بنصف سرعة الضوء، وبالطريقة نفسها، يمكننا أن نفترض الطول بطبيعة الحال ونقيسه بأضعاف طول بلانك، ويمكن افتراض أن $h = ١$ وحساب الحركات بأضعاف ثابت بلانك، وبهذه الطريقة يكون لدينا نظام طبيعي للوحدات

الأساسية يصدر عنه أنظمة أخرى، فوحدة الزمن هي الزمن الذي يستغرقه الضوء ليقطع طول بلانك وهكذا، وعادةً ما تستخدم الوحدات الطبيعية في أبحاث الجاذبية الكمية.

إن تحديد هذه الثوابت الثلاثة الأساسية يضع حدًّا لما بدا احتمالات لا نهائية للطبيعة، وهذا يرجح أن ما نطلق عليه لا نهائي غالبًا ما يكون إلا شيئًا لم نحسبه بعدُ، أو لم نفهمه بعدُ، وأعتقد أن هذا حقيقي في العموم، ففي النهاية، نجد أن مصطلح «لا نهائي» هو الاسم الذي منحناه لكل ما لم نعرفه بعدُ، يبدو أن الطبيعة تقول لنا: إنه لا يوجد شيء لا نهائي حقًّا.

يوجد لا نهائية أخرى تربك تفكيرنا، وهي الامتداد الفضائي اللانهائي للكون، وكما أوضحت في الفصل الثالث، فقد وجد أينشتاين طريقة للتفكير في كون محدود بلا حدود، توضح القياسات الحالية أن حجم الكون لا بد أن يكون أكبر من ١٠٠ مليار سنة ضوئية، هذه القيمة الأسية للكون التي توصلنا لها على نحو غير مباشر، فهي أكبر بحوالي 10^{120} مرة من طول بلانك، وهو عدد من المرات مكون من ١ متبوعًا بنحو ١٢٠ صفرًا، وبين مقياس بلانك وبين المقياس الكوني، يوجد الفاصل المدهش الذي يبلغ ١٢٠ قيمة أسية، إنه ضخم، بل مفرط في الضخامة، لكنه «محدود».

في هذا الفضاء: بين حجم كمات الفضاء الدقيقة، وصولًا إلى الكواركات والبروتونات والذرات والبنى الكيميائية والجبال والنجوم والمجرات (التي تتكون كل منها من مائة مليار نجم) وعناقيد المجرات، وصولًا إلى الكون المرئي الذي يبدو لا حدود له والمكون مما يزيد عن ١٠٠ مليار مجرة؛ ينكشف التعقيد الحافل للكون؛ ذلك الكون الذي لا نعرف عنه إلا بعض سمات قليلة، ذلك الكون الهائل والمحدود.

ينعكس المقياس الكوني في قيمة الثابت الكوني Λ الذي يدخل في المعادلات الأساسية لنظرياتنا؛ ولذلك تحتوي النظرية الأساسية على رقم كبير جدًّا، وهو النسبة بين الثابت الكوني وطول بلانك، إنه الرقم الكبير

الذي يفتح الطريق أمام تعقيد الشاسع للعالم، إلا أن ما نراه ونفهمه من الكون ليس لا نهائية لنغوص فيها، إنه بحر عريض، لكنه محدود.

يبدأ سِفْر يشوع بن سيراخ* بسؤال مدهش ألا وهو:

من يستطيع أن يحصي رمل البحار، وقطار (قطرات) المطر، وأيام الدهر (الأبدية)؟ ومن يمسح (يحسب) سُمك (طول) السماء، ورحب (عرض) الأرض، و(الغمر) البحار، ومن يستقصي الحكمة؟

ولم يمر وقت طويل على تأليف هذه السطور حتى كتب نص عظيم آخر بافتتاحية ما زال يتردد صداها على النحو التالي:

يعتقد البعض أيها الملك هيرو أن حبيبات الرمال لا يمكن عدها.

هذه افتتاحية كتاب «عداد الرمل» الذي كتبه أرشميدس، وفيه عد أعظم عالم في العصور القديمة حبيبات الرمال في الكون!

لقد فعل ذلك ليوضح أن عدد الرمال كبير لكنه نهائي ويمكن تحديده، إن النظام الرقمي في العصور القديمة لا يسمح بالتعامل مع الأرقام بالغة الكبر بسهولة، وفي كتاب «عداد الرمل» طور أرشميدس نظامًا رقميًّا جديدًا شبيهًا بالقيم الأسية، وهذا النظام يسمح لنا بالتعامل مع الأرقام الكبيرة جدًّا، ويوضح قوته من خلال عد حبيبات الرمال (على نحو هزلي بالتأكيد) الموجودة على شواطئ البحار والموجودة أيضًا في الكون كله.

إن كتاب «عداد الرمل» هزلي لكنه عميق، فمن خلال خيال يبدو أنه يسبق عصر النهضة بآلاف السنين، يتمرد أرشميدس ضد الشكل المعرفي الذي أصر على وجود ألغاز عصية الفهم «بطبيعتها» على الفكر البشري، إنه

* يعتبر الكاثوليك سِفْر يشوع بن سيراخ جزءًا من الكتاب المقدس، وتعتبره كذلك معظم الكنائس الأرثوذوكسية الشرقية وبعض اليهود، وأضافته الكنائس اللوثرية إلى القراءات الكتابية، واعتبرته كتابًا مناسبًا للقراءة والتعبد والصلاة، لكن لم تعتبره جزءًا من الكتاب المقدس، والأمر مشابه بالنسبة لمعظم اليهود وبالنسبة للكنيسة الإنجيلية.

لا يزعم أنه يعرف أبعاد الكون الدقيقة، أو عدد حبيبات الرمل بالتحديد، إنه لا يؤكد كمال معرفته؛ بل على العكس، فهو واضح بشأن الطبيعة التقريبية والمؤقتة لتقديراته، إنه يتحدث عن بدائل ممكنة متعلقة بالحجم الحقيقي للكون، ولا يختار خيارًا محددًا من بينها، المسألة هنا ليس افتراض معرفة كل شيء، بل إنها نقيض ذلك، فهي إدراك أن اليوم يمكن أن يلقي الضوء على جهل الأمس، وأن جهل اليوم يمكن أن ينيره الغد.

النقطة الأساسية هي الثورة على الانصراف عن الرغبة في المعرفة، وإعلان الإيمان بإمكانية فهم العالم، وانتقامًا باعثًا على الفخر ردًّا على أولئك الذين ظلوا قانعين بجهلهم، الذين يطلقون كلمة «لا نهائي» على كل الأمور التي لا يفهمونها ويعزون المعرفة إلى أي شيء آخر.

على الرغم من مرور قرون، فإن سِفْر يشوع بن سيراخ وبقية الكتاب المقدس يمكن أن تجده في عدد لا حصر له من المنازل، بينما كتاب أرشميدس لا يقرأه إلا القليل، وأثناء نهب مدينة سرقوسة، ذبح الرومان أرشميدس، وسرقوسة هي آخر مدينة شامخة من مدن اليونان الكبرى «الماجنا جراسيا» تقع في الأسر الروماني، أثناء توسع الإمبراطورية المستقبلية التي سرعان ما ستقبل «سفر يشوع بن سيراخ» كأحد الكتب الأساسية في دينها الرسمي، وسيظل السفر يحتل هذه المكانة لما يزيد عن ألف سنة، وأثناء هذه الألفية، ظلت حسابات أرشميدس عصيَّة على الفهم، حيث لم يتمكن أحد من استخدامها أو حتى فهمها.

بالقرب من مدينة سرقوسة التي كان يعيش فيها أرشميدس كان يوجد مكان من أجمل الأماكن في إيطاليا ألا وهو مسرح تاورمينا المطل على البحر المتوسط، وعلى جبل إتنا البركاني الذي يتصاعد منه الدخان، وفي زمن أرشميدس كان المسرح يستخدم لعرض مسرحيات سوفوكليس ويوريبيديس، وأجرى الرومان تعديلات عليه ليكون مناسبًا لقتال المصارعين، لحبهم في مشاهدة المصارعين وهم يموتون.

إن المزاح المعقد الذي يميز كتاب «عداد الرمل» لا يتعلق فحسب بجرأة البناء الرياضي أو براعة أحد العقول النابهة في العصور القديمة، بل يمثل أيضًا صرخة تحدٍّ منطقية تدرك جهلها وترفض في الوقت نفسه أن تمنح للآخرين مصدر المعرفة، إن إعلانًا قصيرًا ومتحفظًا وبالغ الذكاء يناهض اللانهائية ويناهض الميل إلى عرقلة المعرفة.

إن الجاذبية الكمية تعد أحد خطوط كثيرة تكمل مسعى كتاب «عداد الرمل»، إننا نعد حبيبات الفضاء التي يتكون منها الكون، فهو كون شاسع، لكنه محدود.

الأمر الوحيد اللانهائي حقًّا هو جهلنا.

انضم إلى مكتبة اضغط اللينك

t.me/t_pdf

الفصل الثاني عشر

المعلومات

اقتربنا من نهاية الرحلة، وفي الفصول القليلة السابقة تحدثت عن التطبيقات الملموسة للجاذبية الكمية؛ وتمثل ذلك في وصف ما حدث للكون في زمن انفجار البيج بانج العظيم، ووصف صفات حرارة الثقوب السوداء وقمع اللانهائية.

وقبل الختام أود أن أعود إلى النظرية، لكن لألقي النظر على مستقبلها، ولأتحدث عن المعلومات، ذلك الشبح الذي يطارد الفيزياء النظرية ويثير الحماس والتشوش.

هذا الفصل مختلف عن الفصول السابقة التي تحدثت فيها عن أفكار ونظريات لم تخضع للتجربة بعدُ لكنها محددة جيدًا؛ أما في هذا الفصل فإنني أتحدث عن أفكار ما زالت مشوشة، وفي حاجة ماسَّة إلى التنظيم، فإذا كنت أيها القارئ العزيز قد وجدت الرحلة صعبة نسبيًّا حتى هذه اللحظة، فتمسك جيدًا لأننا سنحلق الآن بين فراغات هوائية، وإذا بَدَا هذا الفصل شديد الغموض، فاعلم أن السبب ليس تخبط أفكارك، فالسبب هو أن مشوش الأفكار هو أنا.

في وقتنا الحاضر، يشك كثير من العلماء في أن مفهوم «المعلومات» قد يتضح أنه مفتاح لأوجه تقدم جديدة في الفيزياء، المعلومات مذكورة في أسس الديناميكا الحرارية وعلم الحرارة وأساس ميكانيكا الكم وغيرها من المجالات، وغالبًا ما تُسْتَخْدَم الكلمة على نحو غير دقيق، وأعتقد أنه ثمة أمر

مهم في هذه الفكرة، وسأحاول أن أشرح السبب، وأن أوضح المعلومات المتعلقة بالجاذبية الكمية.

لكن قبل أي شيء آخر، ما «هي» المعلومات؟ تستخدم كلمة «معلومات» في اللغة العادية لتعني مجموعة من الأمور المختلفة، وهذا النوع من عدم التحديد يعد مصدر حيرة في العلم أيضًا، ورغم ذلك، فإن فكرة العلم عن المعلومات حددها بوضوح عام ١٩٤٨ عالم الرياضيات والمهندس الأمريكي كلود شانون، وهي أمر في غاية البساطة: فالمعلومات هي قياس عدد البدائل المتاحة لأحد الأمور، فعلى سبيل المثال، إذا رميت الزهر فمن الممكن أن يسقط على أحد جوانبه الستة، وإذا رأيناه يسقط على جانب معين من هذه الجوانب فسيكون لدينا قدر من المعلومات $N = ٦$؛ لأن عدد البدائل الممكنة يساوي ستة، وإذا كنت لا أعلم أي يوم من أيام السنة يوافق عيد ميلادك؛ فهذا يعني أن لدي ٣٦٥ احتمالًا محددًا، وإذا أخبرتني عن يوم ميلادك، فستكون المعلومة $N = ٣٦٥$، وهكذا.

وبدلًا من عدد البدائل N يقيس العلماء المعلومات من حيث الكمية ويطلقون عليها S نسبةً إلى «معلومات شانون»، وتعرف S على أنها لوغاريتم بالنسبة للأساس ٢ في المعادلة $N:S = \log_2 N$، وميزة استخدام اللوغاريتم هو أن وحدة القياس $S = ١$ توافق $N = ٢$ (لأن $\log_2 ٢ = ١$)، مما يجعل وحدة المعلومة هو أقل عدد من البدائل: أي الاختيار بين «احتمالين»، ويطلق على وحدة القياس «بت»، وفي لعبة الروليت، عندما أعلم أن رقم أحمر جاء بدلًا من رقم أسود، فسيكون لديَّ وحدة واحدة من المعلومات؛ وعندما أعلم أن رقم «أحمر» و«زوجي» قد فاز، سيكون لديَّ وحدتين من المعلومات؛ وعندما يفوز رقم أحمر زوجي «منخفض» (ثمانية عشر أو أقل، بلغة الروليت)، عندها يصبح لديَّ ثلاث «بتات» من المعلومات، وحدتي «بت» من المعلومات توافق أربعة بدائل (أحمر زوجي، أحمر فردي، أسود

زوجي، أسود فردي)، وثلاث بتات من المعلومات توافق ثمانية بدائل، وهكذا.*

من المهم معرفة أن المعلومات يمكن أن توجد في أحد الأماكن، تخيل مثلًا أن في يدي كرة يمكن أن تكون سوداء أو بيضاء، وتخيل أيضًا أن في يدك كرة يمكن أن تكون سوداء أو بيضاء، من جانبي، سيكون لديَّ احتمالان، ومن جانبك سيكون لديك احتمالان، والعدد الكلي للاحتمالات هو أربعة (٢ × ٢): أبيض-أبيض، وأبيض-أسود، وأسود-أبيض، وأسود-أسود، افترض الآن أننا متأكدون لسبب ما أن الكرتين مختلفتين في اللون (مثلًا لأننا أخذنا الكرات من صندوق يحتوي على كرة بيضاء واحدة وكرة سوداء واحدة)، في هذه الحالة سيكون العدد الكلي للبدائل هو ٢ «فقط» (أبيض-أسود أو أسود-أبيض)، حتى وإن كانت البدائل لا زالت اثنين في جانبي واثنين في جانبك، لاحظ أنه في هذا الموقف يحدث أمر غريب؛ لأنك إذا نظرت إلى كرتك، فسوف «تعرف لون كرتي»، وفي هذه الحالة نقول: إن ألوان الكرتين مترابطة، أي مرتبطة كل منهما بالأخرى، ونقول: إن كرتي «لديها معلومات» عن كرتك (والعكس بالعكس أيضًا).

وإذا فكرت في الأمر ستجد أن هذا بالضبط ما يحدث في الحياة عندما نتواصل؛ فعلى سبيل المثال، عندما أتصل بك تليفونيًا، فإنني أعلم أن التليفون يجعل صوت التليفون على جانبك معتمدًا على صوت تليفوني، إن كلا الصوتين على كلا الجانبين مرتبطان، مثل ألوان الكرتين.

اختيار هذا المثال لم يأت عشوائيًا، فلقد كان شانون مبتكر نظرية

* ملحوظة ضمنية: لا تقيس المعلومات ما أعرفه لكن تقيس عدد البدائل الممكنة، فالمعلومات التي أحصل عليها عندما يظهر الرقم ٣ في الروليت هو $N = ٣٧$ لأنه يوجد ٣٧ رقم؛ لكن المعلومات التي أحصل عليها عندما يفوز الرقم ٣ على المربع الأحمر هي $N = ١٨$؛ لأنه يوجد ١٨ رقم أحمر، فكم عدد المعلومات التي نحصل عليها إذا علمنا أن الإخوة كارامازوف قتلوا والدهم؟ الجواب يعتمد على عدد الإخوة كارامازوف الموجودين.

المعلومات يعمل في شركة تليفونات، وكان يبحث عن طريقة ليقيس بالضبط القدر الذي يستطيع أن «يحمله» خط التليفون، لكن «ماذا» يحمل خط التليفون؟ إنه يحمل المعلومات، إنه يحمل القدرة على التمييز بين البدائل، ولهذا السبب حدد شانون المعلومات.

لماذا فكرة المعلومات مفيدة بل وربما أساسية لفهم العالم؟ إنها كذلك لسبب خفي، ويتمثل هذا السبب في أنها تقيس قدرة أحد الأنظمة الفيزيائية على التواصل مع نظام فيزيائي آخر.

دعونا نعود لمرة أخيرة إلى ذرات ديموقريطوس، تخيل عالمًا مكونًا من بحر لا حدود له من الذرات التي ترتد وتتجاذب وتتعلق ببعضها البعض، ولا يتكون من أي شيء آخر، أليس ينقصنا شيء؟

أصر أفلاطون وأرسطو أيضًا على وجود شيء ناقص؛ واعتقدا أن «شكل» الأشياء كان هذا الشيء «الإضافي» اللازم إضافته إلى «الجوهر» الذي تتكون منه الأشياء من أجل فهم العالم، رأى أفلاطون أن الأشكال توجد بنفسها في عالم أشكال مثالي أثيري، وهو عالم من «الأفكار»، ففكرة الحصان توجد قبل أي حصان حقيقي وعلى نحو مستقل عنه، بالنسبة لأفلاطون فإن الحصان الحقيقي ليس إلا انعكاس شاحب لفكرة الحصان، فالذرات المكونة للحصان لا تساوي إلا القليل، أما المهم فهو «كونه حصان»، أي الشكل المجرد، أما أرسطو فهو أكثر واقعية نسبيًّا، حيث يرى أيضًا أنه لا يمكن اختزال الشكل في الجوهر، فالتمثال مكون من أشياء «أكثر» من مجرد الحجر المصنوع منه، وهذه الأشياء «الأكثر» حسبما يرى أرسطو هي الشكل، وهذا هو أساس نقد مادية ديموقريوطوس في العصور القديمة، وما زال هذا نقدًا شائعًا للمادية.

لكن هل كان ديموقريطوس يرجح أن كل شيء يمكن اختزاله إلى ذرات؟ دعونا نلقي نظرة عن كثب، لقد قال ديموقريطوس: إنه عندما تجتمع الذرات يكون المهم هو شكلها، وترتيبها في البنية، بالإضافة إلى طريقة

«تجمعها»، وضرب مثلًا بحروف الألفبائية، حيث يوجد ما يقرب من عشرين حرفًا، وحسبما قال ديموقريطوس: «فمن الممكن أن تجتمع بطرق مختلفة لتنتج مسرحيات كوميدية أو مسرحيات تراجيدية أو قصص سخيفة أو قصائد ملحمية.»

هناك ما هو أكثر من مجرد الذرات في هذه الفكرة، فالمهم هو «طريقة» تجمعها من حيث علاقة كل منها بالأخرى، لكن ما العلاقة التي يمكن أن تتخذها طريقة تجمع الذرات في عالم لا يوجد فيه إلا ذرات أخرى؟

ولو كانت الذرات هي أيضًا ألفبائية، فمن يستطيع قراءة العبارات المكتوبة بهذه الألفبائية؟

الجواب غامض نسبيًّا، وهو كالتالي: إن طريقة ترتيب الذرات لنفسها مرتبطة بطريقة ترتيب الذرات «الأخرى» لنفسها؛ لذلك فإن مجموعة الذرات يمكن أن يكون لديها «معلومات» بالمعنى التقني المحدد المذكور سابقًا عند الحديث عن مجموعة ذرات أخرى.

هذا ما يحدث باستمرار في العالم المادي، في كل لحظة وفي كل مكان؛ فالضوء الذي يصل إلى عيوننا يحمل معلومات عن الأشياء التي وقع عليها؛ ولون البحر يحمل معلومات عن لون السماء فوقه؛ والخلية تحمل معلومات عن الفيروس الذي يهاجمها؛ والكائن الحي الجديد يحمل معلومات كثيرة؛ لأنه مرتبط بوالديه وفصيلته؛ وأنت أيها القارئ العزيز أثناء قراءتك لهذه السطور تتلقى معلومات عما أفكر فيه أثناء كتابته، أي أثناء كتابة هذا الكتاب، وما يحدث في ذرات دماغك ليس مستقلًا عما يحدث في ذرات دماغي؛ لأننا نتواصل.

إذًا فالعالم ليس مجرد شبكة من الذرات المتصادمة، بل أيضًا شبكة ارتباطات بين مجموعات من الذرات، فهو شبكة معلومات متبادلة حقيقية بين الأنظمة الفيزيائية.

في كل هذا لا يوجد شيء مثالي أو روحاني، بل مجرد تطبيق لفكرة شانون التي تقضي بإمكانية عد كل البدائل، وكل هذا يعد جزءًا من العالم تمامًا مثل أحجار جبال الدولوميت وطنين النحل وأمواج البحر.

بمجرد أن نفهم أن شبكة المعلومات المتبادلة تلك موجودة في الكون، سيكون من الطبيعي أن نسعى إلى استخدام هذا الكنز في فهم العالم، دعونا نبدأ بعنصر من عناصر الطبيعة مفهوم جيدًا منذ نهاية القرن التاسع عشر ألا وهو الحرارة، ما «هي» الحرارة؟ ماذا يعني قول إن الشيء ساخن؟ لماذا يبرد فنجان الشاي شديد السخونة نفسه بدلًا من أن يرفع حرارته أكثر؟

كان العالم النمساوي لودفيج بولتزمان مؤسس الميكانيكا الإحصائية أول من فهم سبب ذلك،* الحرارة هي الحركة المجهرية العشوائية للجزيئات؛ وعندما يكون الشاي ساخنًا تكون حركة الجزئيات أكثر نشاطًا؟ فلماذا يبرد؟ خاطر بولتزمان بافتراض فرضية رائعة، حيث قال: إن عدد الحالات الممكنة للجزيئات عندما يكون الشاي ساخنًا والهواء باردًا أصغر من عدد الحالات الممكنة عندما يكون الشاي باردًا ويكون الهواء أسخن نسبيًّا، وتنشأ الحالة المركبة عن موقف يكون فيه الحالات الممكنة أقل لموقف حالاته الممكنة أكثر، فالشاي لا يمكن أن يبرد نفسه؛ لأن المعلومات لا يمكن أن تزيد من تلقاء نفسها.

سأشرح ذلك، إن جزيئات الشاي كثيرة العدد وشديدة الصغر، ولا نعلم حركتها بالضبط، ومن ثم، فإننا نفتقر إلى المعلومات، والافتقار إلى المعلومات — المعلومات الناقصة — يمكن حسابه، (وقد حسب بولتزمان المعلومات الناقصة؛ حيث حسب عدد الحالات المحددة التي يمكن أن تكون عليها الجزيئات، وهذا العدد يعتمد على الحرارة.) فإذا برد الشاي انتقل جزء قليل من طاقته عبر الهواء المحيط؛ ومن ثم تتحرك جزيئات الشاي بمزيد من البطء وتتحرك جزيئات الهواء على نحو أسرع،

* لم يستخدم بولتزمان مفهوم المعلومات، لكن يمكن قراءة عمله بهذه الطريقة.

وإذا حسبت المعلومات الناقصة، فسوف تكتشف أنها زادت، أما إذا امتص الشاي الحرارة من الهواء الأكثر برودة، فسوف تقل المعلومات الناقصة، أي إننا سوف نعرف أكثر، لكن المعلومات لا تهبط من السماء، فلا يمكن أن تزيد من تلقاء نفسها؛ لأننا لا نعلم فحسب؛ ولذلك فالشاي لا يمكن أن يسخن من تلقاء نفسه عندما يحتك بالهواء البارد، فهذا الأمر يبدو سحريًّا بعض الشيء لكنه فعال، فمن الممكن أن نتوقع طريقة تصرف الحرارة على أساس ملاحظة أن المعلومات لا يمكن أن تزيد مجانًا!

لم يأخذ أحد بولتزمان على محمل الجد، وانتحر بولتزمان في سن الخامسة والستين في دوينو بالقرب من مقاطعة تريسيتي، واليوم يعتبر واحدًا من عباقرة الفيزياء، ونقش على قبره معادلته على النحو التالي:

$$s = k \log W$$

التي تعبر عن المعلومات (الناقصة) في صورة لوغاريتم عدد البدائل، وهذه هي فكرة شانون الرئيسية، أوضح بولتزمان أن هذه الكمية تتوافق مع الإنتروبيا المستخدمة في الديناميكا الحرارية، والإنتروبيا هي «المعلومات الناقصة»، أي المعلومات ذات الإشارة السالبة، والكمية الكلية للإنتروبيا لا يمكنها إلا أن تزيد؛ لأن المعلومات لا يمكنها إلا أن تقل.*

اليوم يشيع قبول علماء الفيزياء لفكرة إمكانية استخدام المعلومات كأداة مفاهيمية لإلقاء الضوء على طبيعة الحرارة، وتوجد فكرة أكثر جرأة لكنها تُلْقَى دفاعًا في الوقت الحاضر من عدد متزايد من علماء النظريات، وتتمثل هذه الفكرة في أن مفهوم المعلومات يمكن أن يكون مفيدًا أيضًا في الجوانب الغامضة من ميكانيكا الكم الموضحة في الفصل الخامس.

تذكر أنه من أهم نتائج ميكانيكا الكم تحديدًا حقيقة أن المعلومات محدودة، إن عدد النتائج البديلة التي يمكن أن نحصل عليها من قياس نظام

* تتناسب الإنتروبيا مع لوغاريتم حجم فضاء الطور، ثابت التناسب k هو ثابت بولتزمان الذي يحول وحدات قياس المعلومات (البت) إلى وحدات قياس الإنتروبيا (جول كلفن).

فيزيائي* لا نهائية في الميكانيكا الكلاسيكية، لكن بفضل النظرية الكمية فهمنا أنها محدودة في الواقع، يمكن فهم ميكانيكا الكم على أنها اكتشاف أن المعلومات بطبيعتها محدودة دائمًا.

في الحقيقة، يمكن قراءة البنية الكاملة لميكانيكا الكم وفهمها من حيث المعلومات على النحو التالي، يظهر النظام الفيزيائي نفسه فقط من خلال تفاعله مع نظام فيزيائي آخر، ومن ثم، فإن وصف النظام الفيزيائي يقدم دائمًا من خلال علاقته بالنظام الفيزيائي الآخر الذي يتفاعل معه؛ ولذلك فأي وصف للنظام هو دائمًا وصف «للمعلومات» التي يمتلكها النظام عن النظام الآخر، أي «العلاقة» بين النظامين، إن ألغاز ميكانيكا الكم تصبح أقل غموضًا عند تفسيرها بهذه الطريقة؛ أي تفسيرها على أنها وصف المعلومات التي تمتلكها الأنظمة الفيزيائية عن بعضها البعض.

ففي النهاية لا يعدو وصف النظام عن كونه طريقة لتلخيص كل التفاعلات الماضية التي حدثت معه، واستخدام هذه التفاعلات في توقع تأثير التفاعلات المستقبلية.

وعلى المستوى الكبير، يمكن التعبير عن البنية الرسمية الكاملة لميكانيكا الكم في صيغة افتراضين بسيطين هما:[١]

١- المعلومات وثيقة الصلة في أي نظام فيزيائي محدودة.

٢- يمكنك دائمًا الحصول على معلومات جديدة عن النظام الفيزيائي.

في هذا الصدد، تشير «المعلومات وثيقة الصلة» إلى المعلومات المتوفرة لدينا عن «نظام» معين نتيجة لتفاعلاتنا السابقة معه؛ وتمكننا هذه المعلومات من توقع ماذا ستكون النتيجة تفاعلاتنا المستقبلية مع هذا النظام، تصف الفرضية الأول حُبَيْبِيَّة ميكانيكا الكم؛ أي حقيقة وجود عدد محدود من الاحتمالات، وتصف الفرضية الثانية لا تحديد ميكانيكا الكم؛ أي وجود

* في منطقة محددة في فضائها الطوري.

شيء غير متوقَّع دائمًا يسمح لنا بالحصول على معلومات «جديدة»، وعندما نحصل على معلومات جديدة عن أحد الأنظمة، فإن إجمالي المعلومات وثيقة الصلة لا يمكن أن تزيد على نحو غير محدد (بسبب الفرضية الأولى)، ويصبح جزء من المعلومات السابقة «غير ذي صلة»، أي ليس له أي تأثير على التوقعات المستقبلية، في ميكانيكا الكم، عندما نتفاعل مع أحد الأنظمة، فإننا لا نتعلم شيئًا فحسب، بل أيضًا «نلغي» جزءًا من المعلومات وثيقة الصلة بالنظام.*

إن البنية الرسمية الكاملة لميكانيكا الكم تنبع في الأساس من فرضيتين بسيطتين؛ ولذلك فمن الممكن على نحو مدهش أن نعبر عن النظرية من حيث المعلومات.

كان جون ويلر أبو الجاذبية الكمية أول مَنْ أدرك فكرة أن المعلومات أساسية لفهم الواقع الكمي، وصاغ ويلر عبارة: «كل شيء من وحدة «البت»» ليعبر عن هذه الفكرة، قاصدًا أن «كل شيء عبارة عن معلومات».

بعد ذلك، تظهر المعلومات مرة أخرى في سياق الجاذبية الكمية، تذكر أن مساحة أي سطح يحددها لفات الحلقة التي تقسم هذا السطح، وهذه اللفات عبارة عن كميات محددة، وكل منها تساهم في المساحة.

يمكن أن يتكون سطح ذو مساحة ثابتة من هذه الكمات الأساسية للمساحة بطرق مختلفة، أي بعدد من الطرق N، وإذا عرفت مساحة السطح لكن لم تعرف بالضبط طريقة توزيع كمات مساحته، فسيكون لديك معلومات ناقصة عن السطح، وهذه إحدى طرق حساب حرارة الثقوب السوداء؛ حيث إن مساحة الثقب الأسود المحاط بسطح محدد المساحة يمكن أن يكون لها توزيعات مختلفة محتملة N، الأمر شبيه بمثال فنجان الشاي، حيث يمكن أن تتحرك الجزيئات بطرق محتملة مختلفة N، وبهذه الطريقة يمكننا الربط بين كمية معلومات ناقصة، أي أنتروبيا وبين الثقب الأسود.

* هذا ما أصبح يطلق عليه على نحو غير مناسب «انهيار» الدالة الموجية.

ومن ثم فإن قدر المعلومات المرتبط بالثقب الأسود يعتمد اعتمادًا مباشرًا على المنطقة A من الثقب؛ وكلما زاد حجم الثقب، زاد قدر المعلومات الناقصة.

وعندما تدخل المعلومات في الثقب الأسود، فإنه لا يمكن استرجاعها من الخارج، إلا أن المعلومات التي تدخل الثقب الأسود تحمل معها الطاقة التي من خلالها يصبح الثقب الأسود أكبر وتزداد مساحته، وبالنظر من الخارج، سنجد أن المعلومات المفقودة داخل الثقب الأسود تبدو الآن مثل أنتروبيا مرتبطة بمساحة الثقب، وكان أول من شك في أمر مشابه لذلك هو عالم الفيزياء الإسرائيلي جاكوب بيكنشتاين.

إلا أن الموقف واضح، فكما رأينا في الفصل السابق فإن الثقوب السوداء تصدر إشعاعًا حراريًّا وتتبخر ببطء شديد، وتصبح أصغر فأصغر إلى أن تختفي على الأرجح غارقة في محيط الثقوب السوداء المجهرية الذي يكوِّن الفضاء على مقياس بلانك، فإلى أين ينتهي المطاف بالمعلومات التي سقطت في الثقب الأسود أثناء تقلصه؟ ما زال علماء الفيزياء النظرية يتناقشون في هذا السؤال، ولا يمتلك أي منهم إجابة واضحة بالكامل.

أعتقد أن كل هذا يوضح أننا لكي نفهم القواعد الأساسية للعالم نحتاج إلى دمج ثلاثة مكونات أساسية، وليس مكونين اثنين متمثلين في النسبية العامة وميكانيكا الكم، بل يجب أيضًا أن ندمج معهما نظرية الحرارة، أي الميكانيكا الإحصائية والميكانيكا الحرارية، وكلتاهما يمكن وصفهما أيضًا بنظرية المعلومات، إلا أن الديناميكا الحرارية للنسبية العامة، أي الميكانيكا الإحصائية لكمات الفضاء ما زالت في أولى مراحلها حتى هذه اللحظة، فما زال كل شيء مشوشًا، وما زالت أمور كثيرة غير مفهومة.

كل هذا يقودنا إلى آخر فكرة سأتطرق إليها في هذا الكتاب ألا وهي الزمن الحراري.

الزمن الحراري

المشكلة الأساسية في فكرة الزمن الحرارية بسيطة، ففي الفصل السابع أوضحت أنه ليس من الضروري استخدام فكرة الزمن لوصف الفيزياء، فمن الأفضل أن ننسى الزمن تمامًا، فالزمن لا يلعب دورًا في المستوى الأساسي للفيزياء، وبمجرد أن نفهم ذلك، سيكون من الأسهل كتابة معادلات الجاذبية الكمية.

هناك الكثير من الأفكار اليومية التي لم تعد تلعب أي دور في المعادلات الأساسية للكون، مثل فكرة «فوق» و«تحت»، أو «ساخن» و«بارد»، ومن ثم فليس غريبًا جدًّا اختفاء الأفكار العادية المشتركة من الفيزياء الأساسية، ورغم ذلك، فبمجرد أن نقبل هذه الفكرة، فإننا نستقبل بوضوح مشكلة ثانية.

فكيف نستعيد أفكار تجاربنا اليومية؟ كيف تظهر في سياقنا المحدد؟

على سبيل المثال، لا تدخل فكرة «فوق» وفكرة «تحت» في معادلات نيوتن، لكننا نعلم ماذا تعني في نظام يخلو من فكرة فوق وتحت على نحو مطلق، إن «فوق» و«تحت» يصبح لهما معنى بالقرب من كتلة كبيرة مثل الكوكب، حيث يشير «تحت» إلى الاتجاه الذي تمارس صوبه الكتلة القريبة الكبيرة قوة الجذب؛ وتشير «فوق» إلى الاتجاه المعاكس، والأمر نفسه ينطبق على «ساخن» و«بارد»، حيث لا يوجد أشياء «ساخنة» أو «باردة» على المستوى المجهري، لكن عندما نجمع عددًا كبيرًا من المكونات المجهرية ونصفها من حيث المتوسطات، عندها تظهر فكرة «الحرارة»، فالجسم الساخن عبارة عن جسم يزداد فيه متوسط سرعة المكونات المنفردة، يمكننا فهم معنى «فوق» أو «ساخن» في مواقف معينة، تتمثل في وجود كتلة قريبة، أو تعاملنا مع متوسط قيم الجزيئات، وهكذا.

لا بد أن ثمة أمر مشابه ينطبق على «الزمن»، إذا لم يكن لفكرة الزمن أي دور لتلعبه على المستوى الأولي، فمن المؤكد أنها تلعب دورًا أساسيًّا

في حياتنا، كما هو الحال مع فكرتَي «فوق» و«ساخن»، فماذا يعني «مرور الزمن» إذا كان الزمن لا يلعب دورًا في الوصف الأساسي للعالم؟

الجواب بسيط: فمن الممكن أن يكون أصل الزمن شبيهًا بأصل الحرارة، حيث يأتي من متوسطات متغيرات مجهرية كثيرة، دعونا نُلْقِي نظرة عن هذا بالتفصيل.

وجود رابط بين الزمن والحرارة فكرة قديمة ومتكررة، فإذا فكرت في الأمر، ستجد أن كل الظواهر التي نلمس فيها مرور الزمن مرتبطة بالحرارة، أبرز ما يميز الزمن هو سيره للأمام وليس للخلف، وهذا يعني وجود «ظواهر غير قابلة للعكس»، والظواهر الميكانيكية — أي الظواهر التي لا تتضمن حرارة — قابلة للعكس، وإذا صورنا هذه الظواهر ثم شغَّلنا الفيلم عكسيًّا للوراء، فسوف نرى شيئًا واقعيًّا، فإذا صورنا بندولًا يتأرجح، أو حجرًا يُقْذَف لأعلى ثم يسقط، وبعد ذلك شاهدنا الفيلم معكوسًا، فسوف نرى بندولًا متأرجحًا مقنعًا أو حجرًا يرتفع ويسقط على الأرض.

عندما يصل الحجر إلى الأرض فإنه يتوقف، وقد تعترض إذا شاهدت الفيلم معكوسًا، حيث سترى الحجر يقفز لأعلى من تلقاء نفسه، وهذا غير معقول، لكن عندما يصل الحجر إلى الأرض ويتوقف أين تذهب طاقته؟ إنها «تسخن» الأرض! في اللحظة نفسها التي تنتج فيها الحرارة تصبح العملية غير قابلة للعكس، فالماضي يختلف عن المستقبل، فالحرارة دائمًا وفقط هي ما يميز الماضي عن المستقبل.

وهذا أمر عام، فالشمعة المشتعلة تتحول إلى دخان — والدخان لا يمكن أن يتحول إلى شمعة — والشمعة تنتج حرارة، فنجان الشاي شديد السخونة يبرد ولا تزداد حرارته، فهو يشع حرارة، إننا نعيش ونتقدم في العمر ونصدر حرارة، تتهالك الدراجة القديمة مع مرور الزمن، فهي تنتج حرارة عن طريق الاحتكاك، تأمل النظام الشمسي، ستجد من الوهلة الأولى أنه يستمر في الدوران مثل آلية هائلة ثابتة دائمًا على حالتها، إنه لا يصدر

حرارة، وفي الحقيقة إذا شاهدته معكوسًا فلن ترى شيئًا مختلفًا بشأنه، أما إذا نظرت عن كثب، فستجد أنه أيضًا ظاهرة غير قابلة للعكس؛ فالشمس تستهلك الهيدروجين القابل للاحتراق وسوف تستنفده في النهاية وتنطفئ، فالشمس أيضًا تتقدم في العمر، وتصدر حرارة أيضًا في واقع الأمر، والقمر أيضًا يبدو أنه يدور حول الأرض دائمًا وأنه ثابت لا يتغير، في حين أنه يبتعد بعيدًا ببطء في واقع الأمر، والسبب في هذا أنه يتسبب في المد والجزر، والمد والجزر يسخنان البحر قليلًا، ومن ثم يتبادل الطاقة مع القمر، عندما تتأمل ظاهرة تؤكد مرور الزمن، اعلم أنها تؤكد ذلك من خلال إنتاج الحرارة، فلا يوجد اتجاه مفضل للزمن بدون الحرارة.

إلا أن الحرارة هي طريقتنا في تسمية متوسطات المتغيرات الكثيرة.

وفكرة الزمن الحراري تعكس هذه الملاحظة، وهذا يعني أنها بدلًا من التساؤل عن كيفية تبدد الحرارة بفعل الزمن، فإنها تسأل كيف تنتج الحرارة الزمن.

بفضل بولتزمان عرفنا أن فكرة الحرارة تأتي من حقيقة أننا نتفاعل مع المتوسطات، وفكرة الزمن الحراري تتمثل في أن فكرة الزمن أيضًا تأتي من تفاعلنا فقط مع متوسطات متغيرات كثيرة.*

ما دام لدينا وصف «كامل» لأحد الأنظمة، فإن كل متغيرات النظام تكون متساوية، أي أن لا أحد من المتغيرات يعمل كمتغير زمني، وهذا يعني عدم ارتباط أي منها بظواهر غير قابلة للعكس، أما بمجرد وصف النظام من خلال متوسطات متغيرات عديدة، فسوف يصبح لدينا متغير مفضل يعمل

---

* إليك كيف يسير الأمر من الناحية التقنية: يصف حالة بولتزمان الإحصائية دالة في فضاء الطور صادرة عن الدالة الأسية للمؤثر الهاملتوني، والمؤثر الهاملتوني هو الذي يتولد عنه تطور الزمن، وفي النظام الذي لا يحدد فيه الزمن لا يكون هناك مؤثر هاملتوني، أما إذا كان لدينا حالة إحصائية، فإننا نأخذ اللوغاريتم الخاص بها، وهذا يحدد المؤثر الهاملتوني، ومن ثم فكرة الزمن.

مثل الزمن العادي، ذلك الزمن الذي تتبدد فيه الحرارة، ذلك الزمن الذي نشهده في تجاربنا اليومية.

نظرًا لأن الزمن ليس مكونًا أساسيًا من مكونات العالم، بل يظهر لأن العالم شاسع بينما نحن أنظمة صغيرة داخل هذا العالم تتفاعل فقط مع متغيرات عيانية تمثل متوسطات وسط متغيرات مجهرية صغيرة لا تُعَد ولا تُحْصَى؛ فإننا في حياتنا اليومية لا نرى أبدًا جسيمًا أساسيًا أو كمة واحدة من كمات الفضاء، إننا نرى الأحجار والجبال ووجوه أصدقائنا، وكل أمر من هذه الأمور التي نراها مكون من عدد لا يُحْصَى من المكونات الأساسية، إننا مرتبطون دائمًا بالمتوسطات، والمتوسطات تتصرف كمتوسطات، فهي تبدد الحرارة، وتولد الزمن بطبيعة الحال.

إن صعوبة فهم هذه الفكرة نابعة من صعوبة التفكير في عالم بلا زمن، وفي زمن ينشأ بطريقة تقريبية، لقد اعتدنا على اعتقاد أن الواقع موجود في الزمن، إننا مخلوقات تعيش في الزمن؛ فنحن نسكن في الزمن ونترعرع به، إننا نتيجة لهذه الزمنية الناجمة عن متوسط قيم متغيرات مجهرية، ورغم ذلك، فإن قدراتنا الحدسية المحدودة يجب ألا تضللنا، ففي أغلب الأحيان، يتطلب فهم العالم على نحو أفضل معارضة الحدس، ولو كان الأمر غير ذلك، لكان الفهم أسهل.

إن الزمن نتيجة لتجاهلنا للحالات المجهرية الفيزيائية للأشياء، إن الزمن معلومة غير موجودة عندنا.

الزمن هو جهلنا.

الواقع والمعلومات

لماذا تلعب المعلومات هذا الدور المحوري؟ ربما لأننا يجب ألا نخلط بين ما نعرفه عن النظام وبين الحالة المطلقة للنظام نفسه، فما نعرفه هو شيء

يخص العلاقة بيننا وبين النظام، فالمعرفة بطبيعتها تخص العلاقات؛ فهي تعتمد على المفعول قدر اعتمادها على الفاعل، إن فكرة «حالة» النظام تشير على نحو واضح أو على نحو ضمني إلى نظام آخر، لقد خدعتنا الميكانيكا الكلاسيكية وجعلتنا نعتقد أننا يمكننا الاستغناء عن هذه الحقيقة البسيطة، وأننا يمكننا الحصول — ولو نظريًّا — على نسخة من الواقع مستقلة تمامًا عن الرائي، إلا أن تطور الفيزياء قد أوضح لنا في النهاية أن هذا مستحيل.

يُرْجَى الانتباه إلى أنني عندما أقول: «لدينا معلومات» عن درجة حرارة فنجان الشاي، أو أننا «ليس لدينا معلومات» عن سرعة كل جزيء، فإنني لا أتحدث عن حالات ذهنية أو أفكار مجردة، بل أقول: إن قوانين الفيزياء تحدد العلاقة بيننا وبين الحرارة (مثال ذلك: عندما أنظر إلى الترمومتر) لا بيننا وبين سرعة كل جزيء من الجزيئات، إنها فكرة المعلومات نفسها التي بدأت بها هذا الفصل؛ فالكرة البيضاء الموجودة في يدك «لديها معلومات» عن حقيقة أن الكرة الموجودة في يدي سوداء، إننا نتعامل مع حقائق فيزيائية لا أفكار ذهنية، وبهذا المعنى، فإن الكرة لديها معلومات حتى وإن كانت الكرة ليس لها حالات ذهنية، تمامًا كما هو الحال مع وحدة تخزين الذاكرة المؤقتة (يو إس بي)، التي تحمل المعلومات (حيث إن عدد الجيجا بايت المطبوع على الجهاز يخبرنا عن قدر المعلومات التي يمكن أن تحتوي عليها)، رغم أنها كوحدة تخزين ذاكرة مؤقتة «يو إس بي» لا يمكنها أن تفكر، وبهذا المعنى — المقصود به العلاقة بين حالات الأنظمة — فإن المعلومات موجودة في كل مكان في الكون.

أعتقد أننا من أجل أن نفهم الواقع يجب أن نضع في اعتبارنا أن الواقع عبارة عن شبكة العلاقات والمعلومات المتبادلة التي تنسج هذا العالم، إننا نقسم الواقع المحيط بنا إلى أشياء، إلا أن الواقع ليس مكونًا من أشياء محددة، بل عبارة عن تدفق متغير، فكر في موجة المحيط واسأل نفسك، أين تنتهي الموجة؟ وأين تبدأ؟ فكر في الجبال واسأل نفسك، أين يبدأ

الجبل؟ وأين ينتهي؟ وإلى أي مدى يمتد أسفل سطح الأرض؟ هذه الأسئلة ليست ذات معنى؛ لأن الموج والجبال ليسوا أشياء في حد ذاتهم، بل طرق «تقسيمنا» للعالم لكي نفهمه، ولكي نتحدث عنه على نحو أسهل، هذه الحدود اختيارية وتقليدية ومريحة، فهي تعتمد علينا (كأنظمة فيزيائية) أكثر من اعتمادها على الأمواج أو الجبال، إنها طرق تنظيم المعلومات المتاحة لدينا، أو على الأحرى إنها أشكال للمعلومات المتاحة لدينا.

وإذا أمعنَّا التفكير، سنجد أن هذا ينطبق على كل شيء حتى الكائنات الحية؛ ولذلك فمن غير المنطق أن نتساءل إذا ما كان الظفر نصف المقصوص ما زال «ظفري» أم أصبح «لا يخصني»؛ أو إذا ما كان الشعر الذي تركته القطة على الأريكة ما زال جزءًا من القطة أم لا؛ أو متى تبدأ حياة الطفل بالتحديد، إن حياة الطفل تبدأ في اليوم الذي يحلم الشخص فيه بالطفل لأول مرة قبل إخصابه بوقت طويل، أو عندما يكون أول صورة ذاتية له، أو عندما يتنفس الطفل لأول مرة، أو عندما يعرف اسمه، أو عندما نضيف أي عدد من الأعراف الأخرى؛ إن كل هذه الأمور مفيدة لكنها اختيارية، إنها طريقة للتفكير، ولتحديد مكاننا داخل هذا الواقع المعقد،

الكائن الحي عبارة عن نظام يعدل نفسه باستمرار لكي يظل كما هو، ويتفاعل بلا توقُّف مع العالم الخارجي، ولا يستمر في البقاء من هذه الكائنات إلا أكثرها كفاءة في فعل ذلك، ومن ثم فإن الكائنات الحية تظهر الصفات التي ناسبتها للبقاء، ولهذا السبب فإن هذه الصفات قابلة للتفسير، ونفسرها من حيث التعمد والهدف؛ ولذلك فإن الجوانب الغائية للعالم البيولوجي (وهذا هو اكتشاف داروين العظيم) هي نتيجة انتقاء أشكال معقدة فعالة في الاستمرار في البقاء، إلا أن الطريقة الفعالة للاستمرار في البقاء في بيئة متغيرة هي إدارة العلاقات مع العالم الخارجي على نحو أفضل؛ وهذه العلاقات تعني المعلومات، ومن ثم فالمقصود جمع وتخزين ونقل وتفصيل المعلومات، ولهذا السبب يوجد الحمض النووي والأنظمة

المناعية والأعضاء الحسية والأجهزة العصبية والأدمغة المعقدة واللغات والكتب ومكتبة الإسكندرية وأجهزة الكمبيوتر وويكيبيديا؛ فكل هذه الأمور تزيد كفاءة إدارة المعلومات، أي كفاءة العلاقات المؤيدة للبقاء.

إن التمثال الذي يراه أرسطو في كتلة الرخام هو أكثر من مجرد كتلة رخام، بل ليس مجرد شكل مجرد يكمن في هذا التمثال، إنه شيء يكمن في العلاقات الموجودة بين عقل أرسطو أو عقولنا وبين الرخام، إنه شيء متعلق بالمعلومات التي يقدمها الرخام بخصوص شيء مهم لأرسطو، أو مهم لنا، إنه شيء يخص تمثال رامي القرص وفيدياس النحات وأرسطو والرخام، ويكمن في ترتيبات ذرات التمثال المترابطة، والعلاقات بينها وبين آلاف غيرها في عقولنا أو في عقل أرسطو، إنها تتحدث عن رامي قرص، مثلما تخبرك الكرة البيضاء الموجودة في يدك أن الكرة الموجودة في يدي سوداء، لقد جُبِلْنَا على إدارة هذه المعلومات بدقة، ويتحقق لنا البقاء بفضل ذلك.

حتى من هذا العرض الوجيز يجب أن يتضح أن فكرة المعلومات تلعب دورًا محوريًّا في محاولات فهم العالم، فمن التواصل إلى أساس علم الوراثة، ومن الديناميكا الحرارية إلى ميكانيكا الكم، ووصولًا إلى الجاذبية الكمية، أحرزت المعلومات تقدمًا كأداة للفهم، يجب ألا نفهم العالم على أنه تجمع ذرات لا شكل له، بل على أنه لعبة مرايا قائمة على العلاقات بين البنى التي تكونها «تجمعات» هذه الذرات.

وكما قال ديموقريطوس، فالمسألة ليست مسألة ذرات فحسب، بل أيضًا «ترتيب» هذه الذرات، فالذرات تشبه حروف الألفبائية؛ إنها ألفبائية استثنائية، فهي ثرية لدرجة تجعلها قادرة على قراءة نفسها وعكس نفسها، والتفكير أيضًا في نفسها، لسنا ذرات بل «ترتيبات» تتخذها الذرات، وهذه الترتيبات قادرة على عكس الذرات الأخرى وعكس أنفسنا.

قدم ديموقريطوس تعريفًا غريبًا للإنسان، فقال: «إن الإنسان هو كل ما نعرفه.»[٢] في الوهلة الأولى يبدو هذا التعريف ساذجًا وخاويًا، لكنه ليس كذلك.

يقول سليمان لوريا أبرز تلاميذ ديموقريطوس: إن ما قاله ديموقريطوس ليس سخفًا، فطبيعة الإنسان ليست بنيته الداخلية بل شبكة التفاعلات الشخصية والعائلية والاجتماعية الموجود داخلها، فهذه الأمور هي ما «تكوننا» وما تحرسنا نحن كبشر عبارة عن الأمور التي يعرفها الآخرون عنا، وعبارة عن الأمور التي نعرفها عن أنفسنا، وعبارة عن الأمور التي يعرفها الآخرون عن معرفتنا، نحن عقد معقدة في شبكة ثرية من المعلومات المتبادلة.

كل هذه الأمور لا تشكل نظرية حتى الآن، إنها مجرد طرق نتبعها، فأنا أومن بالسعي إلى فهم العالم من حولنا على نحو أفضل، ما زال أمامنا أمور كثيرة لنفهمها، وسوف أتحدث عن ذلك في الفصل الأخير.

الفصل الثالث عشر

اللغز

«الحقيقة تكمن في الأعماق.»

ديموقريطوس[1]

لقد وصفت ما أعتقد أنه طبيعة الأشياء في ضوء ما تعلمته حتى هذه اللحظة، لقد لخصت تطور بعض الأفكار الرئيسية عن الفيزياء الأساسية، وأوضحت أبرز الاكتشافات التي حققتها الفيزياء في القرن العشرين وصورة العالم النابعة من أبحاث نظرية الجاذبية الكمية.

هل أنا متأكد من كل هذا؟ لا، لست متأكدًا.

من أوائل وأجمل صفحات تاريخ العلم تلك الفقرة الموجودة في كتاب «فايدو» لأفلاطون الذي يشرح فيه سقراط شكل الأرض.

يقول سقراط: إنه «يؤمن» أن الأرض كرة ذات وديان كثيرة يعيش فيها البشر، وهو محق في الأساس وإن كان مرتبكًا بعض الشيء، ويضيف سقراط: «أنا لست متأكدًا.» هذه الصفحة تفوق كل الهراء الذي يتحدث عن خلود الروح الذي يملأ بقية الحوار، إن الأمر لا يقتصر على كونه أقدم نص وصل لنا يتحدث بوضوح عن حتمية كروية الأرض؛ بل الأهم من ذلك أن أفلاطون يعترف فيه بصورة جلية بـ «حدود» المعرفة في زمنه؛ حيث يقول سقراط: «أنا لست متأكدًا.»

إن هذا الوعي الشديد بجهلنا هو أساس التفكير العلمي، وبفضل إدراك حدود معرفتنا تعلمنا الكثير، فنحن لسنا متأكدين من كل ما نشك فيه،

مثلما كان سقراط غير متأكد من طبيعة الأرض الكروية، إننا نستكشف عند حدود معرفتنا.

إن إدراك حدود معرفتنا هو أيضًا إدراك حقيقة أن ما نعلمه قد يتضح أنه غير صحيح أو غير دقيق، ولن نتمكن من تحرير أنفسنا من الأفكار الخاطئة، ولن نتمكن من التعلم إلا إذا وضعنا في اعتبارنا أن معتقداتنا يمكن أن يتضح أنها خاطئة، فلكي نتعلم شيئًا من الضروري أن نتحلى بشجاعة قبول أن ما نعتقد أننا نعرفه — بما في ذلك معتقداتنا الراسخة — قد يكون خاطئًا، أو على الأقل ساذجًا، ولا يعدو كونه مثل الظلال الموجودة على جدران كهف أفلاطون.

يولد العلم من هذا التواضع المتمثل في عدم الثقة العمياء في معرفة الماضي والحدس، وعدم تصديق ما يقوله الجميع، يولد العلم من عدم تصديق المعرفة المتراكمة من آبائنا وأجدادنا، إننا لن نتعلم شيئًا إذا اعتقدنا أننا نعرف بالفعل الأمور الأساسية، أو افترضنا أنها كانت مكتوبة في كتاب أو معرفة من قبل كبراء القبيلة، فالقرون التي آمن فيها الناس بمعتقداتهم هي القرون التي لم يتوصل فيها إلا للقليل من الأمور الجديدة، ولو كان أينشتاين ونيوتن وكوبرنيكوس وثقوا في معرفة آبائهم، لما شككوا مطلقًا في الأمور ولما تمكنوا من المضي قدمًا بالمعرفة، لو لم تُثَر الشكوك لظللنا نعبد الفراعنة ونعتقد أن الأرض مثبتة على ظهر سلحفاة عملاقة، حتى أكثر الأشكال المعرفية كفاءة مثل تلك التي أسسها نيوتن، قد يتضح في النهاية أنها تفرط في تبسيط الأمور كما أوضح أينشتاين.

أحيانًا يُنتقد العلم بسبب تظاهره بتفسير كل شيء، واعتقاد أنه يمتلك جوابًا لكل سؤال، وهذا اتهام غريب، فكما يعلم كل باحث يعمل في كل مختبر حول العالم، فإن ممارسة العلم يعني الاصطدام بحدود جهلنا يوميًا، وهذا الجهل يتمثل في الأمور التي لا تُعَد ولا تُحْصَى التي لا نعرفها ولا يمكننا فعلها، وهذا مختلف كليًا عن زعم معرفة كل شيء، إننا لا نعرف

أي الجسيمات يمكن أن نراها العام القادم في مختبر سيرن، أو ما ستكشفه التلسكوبات الحديثة، أو المعادلات التي ستصف العالم بصدق؛ إننا لا نعرف كيف نحل المعادلات التي لدينا، وأحيانًا لا نفهم ما تدل عليه؛ إننا لا نعلم إذا ما كانت النظرية الجميلة التي نعمل عليها صحيحة أم لا ، إننا لا نعلم ماذا يوجد وراء انفجار بيج بانج العظيم؛ إننا لا نعلم كيف تعمل العاصفة أو البكتيريا أو العين أو خلايا أجسادنا أو عملياتنا الفكرية، العالم شخص يعيش غارقًا في إدراك جهلنا العميق، ويحتك احتكاكًا مباشرًا مع أوجه قصورنا التي لا تُعَد ولا تُحْصَى، ومع حدود فهمنا.

لكن إذا كنا غير واثقين من أي شيء، فكيف يمكن أن نعتمد على ما يقوله لنا العلم؟ الجواب بسيط، العلم ليس موثوقًا لأنه يمدنا باليقين، بل يكتسب موثوقيته؛ لأنه يمدنا بأفضل الأجوبة المتاحة حاليًا، فالعلم هو أقصى ما نعلمه حتى الآن عن المشكلات التي تواجهنا، إن انفتاح العلم تحديدًا وتشكيكه باستمرار في المعرفة هو ما يضمن لنا أن الأجوبة التي يقدمها هي أفضل ما لدينا حتى هذه اللحظة، وإذا توصلنا لإجابات أفضل فإن هذه الإجابات الجديدة تصبح هي العلم، فعندما وجد أينشتاين إجابات أفضل من إجابات نيوتن لم يشكك في قدرة العلم على إعطاء أفضل الإجابات، بل على العكس لقد أكد هذه القدرة.

ومن ثم، فإن الأجوبة الناشئة عن العلم ليست موثوقة لأنها قاطعة، بل موثوقة لأنها ليست قاطعة، إنها موثوقة لأنها أفضل الأجوبة المتاحة في الوقت الراهن، وهي أفضل ما لدينا لأننا لا نعتبرها قاطعة، بل نراها قابلة للتحسين، إن إدراك جهلنا هو ما يمنح العلم موثوقيته.

والموثوقية هي ما نحتاج إليه وليس اليقين، إننا لا نمتلك اليقين المطلق، ولن نصل إليه أبدًا إلا إذا كنا نقبل الاعتقاد الأعمى، وأكثر الإجابات تصديقًا هي الإجابات التي يقدمها العلم؛ لأن العلم «هو» بحث عن أكثر الإجابات المتاحة قابلية للتصديق، وليس بحثًا عن الإجابات التي تتظاهر بأنها يقينية.

على الرغم من أن العلم قائم على المعرفة السابقة، فإنه مغامرة تقوم على التغيير المستمر، إن القصة التي رويتها تعود إلى آلاف السنوات، وتتبع سردًا للعلم الذي اعتز بالأفكار الجيدة لكنه لم يتردد في نبذ هذه الأفكار عند التوصل لأفكار أخرى تعمل على نحو أفضل، إن التفكير العلمي بطبيعته نقدي ومتمرد ولا يرضى بالتصورات المسلَّم بها التي تتعامل مع الحقيقة بإجلال وتعتبرها كأنها مقدسة أو لا يمكن المساس بها.

وهذا لا يعني عدم تصديق أولئك الذين يقولون: إنهم يمتلكون الحقيقة، ولهذا السبب يتصادم العلم والدين على نحو متكرر، ولا يعود ذلك إلى تظاهر العلم بمعرفة الإجابات المطلقة، بل تحديدًا لسبب مناقض لذلك ألا وهو أن روح العلم تشكك في كل من يزعم «امتلاك» إجابات مطلقة، أو طريق مميز إلى الحقيقة، وهذا التشكيك يسبب إزعاجًا في بعض الأوساط الدينية، فالعلم لا ينزعج من الدين، بل توجد أديان معينة تنزعج من التفكير العلمي.

إن قبول عدم التأكد الرهيب الذي يكتنف معرفتنا يعني قبول العيش مغمورين في الجهل، ومن ثم العيش في لغز، وقبول العيش مع أسئلة لا نعرف لها إجابات، ومن الممكن أن نكون لم نتوصل بعدُ لإجابات هذه الأسئلة حتى الآن، ومَنْ يعلم؟ فمن الممكن ألا نعلم إجاباتها أبدًا.

قد يكون من الصعب العيش مع عدم التأكد، فهناك بعض أشخاص قد يفضلون أي يقين حتى ولو كان لا أساس له، على عدم التأكد النابع من إدراك قصور معرفتنا، وهناك أشخاص يفضلون تصديق قصة ما لمجرد أن أسلاف القبيلة صدقوها بدلًا من أن التحلي بشجاعة قبول عدم التأكد.

الجهل يمكن أن يكون مخيفًا، ومن منطلق هذا الخوف يمكن أن نخبر أنفسنا قصصًا مطمئنة، فنقول: إنه وراء النجوم توجد جنة سحرية بها أب حنون سيرحب بنا ويحتضننا بين ذراعيه، ولا يهم إذا ما كانت القصة حقيقية، فالمهم أنها مطمئنة.

دائمًا ما يوجد في هذا العالم شخص يتظاهر بأنه يخبرنا الإجابات المطلقة، يعج العالم بالأشخاص الذين يقولون: إنهم يمتلكون «الحقيقة»؛ إما لأنهم حصلوا عليها من آبائهم، أو قرأوها في «كتاب عظيم»، أو تلقوها مباشرةً من أحد الآلهة، أو لأنهم وجدوها في قرارة أنفسهم، دائمًا ما يكون هناك شخص يفترض أنه معقل «الحقيقة»، متجاهلًا ملاحظة أن العالم يعج بمعاقل «أخرى» للحقيقة، ينفرد فيها كل معقل بحقيقته الخاصة المختلفة عن حقيقة الآخرين، فهناك دائمًا نبي يرتدي ثيابًا بيضاء يقول: «اتبعوني، فأنا الطريق الحقيقي.»

أنا لا أنتقد أولئك الذين يفضلون تصديق هذه الأمور، فجميعنا أحرار في تصديق ما نريد تصديقه، وعلى العموم، ربما يوجد بعض الحقيقة في المزحة التي رواها القديس أوغسطينوس عندما تتساءل: ماذا كان يفعل الرب قبل خلق العالم؟ لقد كان يجهز الجحيم لأولئك الذين يسعون إلى تفحص الألغاز العميقة،[٢] إلا أن هذه الألغاز العميقة هي بالضبط «الأعماق» التي يحثنا ديموقريطوس في افتتاحية هذا الفصل على البحث عن الحقيقة فيها.

بالنسبة لي، أفضل مواجهة الجهل وقبوله ومحاولة البحث بعيدًا بعض الشيء، وأن نحاول فهم ما يمكننا فهمه، والسبب في ذلك لا يقتصر على أن قبول هذا الجهل هو السبيل لتجنب الوقوع في شَرَك الخرافات والأهواء، بل أيضًا لأن قبول الجهل في المقام الأول يبدو بالنسبة لي الطريق الأحق والأجمل والأكثر أمانة في المقام الأول.

بالنسبة لي، فإن محاولة البحث في نطاق أبعد، والمضي قدمًا من أروع الأمور التي تعطي معنًى للحياة، فهما مثل الحب أو النظر إلى السماء، إن الفضول الدافع إلى التعلم والاكتشاف والنظر إلى ما وراء التل، والرغبة في تذوق التفاحة، هي الأمور التي تجعلنا بشرًا، وفي الكوميديا الإلهية التي كتبها دانتي يذكر يوليسيس رفاقه فيقول لهم: إنهم لم يُصْنَعوا «ليعيشوا مثل البهائم، بل ليبحثوا عن الفضيلة والمعرفة».

إن العالم أكثر روعة وعمقًا من القصص الخيالية التي رواها أجدادنا، وأنا أرغب في الذهاب ورؤيته، إن قبول عدم التأكد لا يقلل من إحساسنا باللغز، بل على العكس، فنحن مغمورون في اللغز وفي جمال العالم، إن العالم الذي تكشفه الجاذبية الكمية عالم جديد وغريب وما زال يعج بالألغاز، لكنه متوافق مع جماله البسيط والواضح.

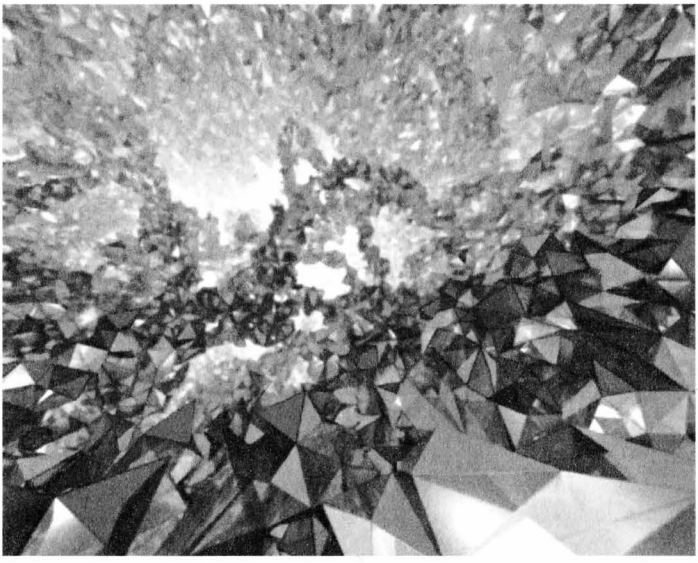
إنه عالم غير موجود في المكان ولا يتطور في الزمان، إنه عالم مكون فقط من المجالات الكمية المتفاعلة التي يولد تجمعها — من خلال شبكة كثيفة من التفاعلات المتبادلة — عن الفضاء والزمان والجسيمات والموجات والضوء (انظر الشكل (١٣ -١)).

يستمر ويستمر ذلك العالم الذي يعج بالحياة والموت

إنه حنون وعدواني وواضح ولا يمكن معرفته.

ويستطرد الشاعر فيقول:

فالعين يمكنها رؤية الكثير من برج المراقبة هذا.[٣]



الشكل (١٣ - ١): تمثيل حدسي للجاذبية الكمية.

إنه عالم يخلو من اللانهائية، ولا يوجد فيه شيء صغير على نحو لا نهائي؛ لأنه يوجد مقياس أدنى لهذا العالم الزاخر لا يوجد شيء أدناه، تختلط كمَّات الفضاء برغوة الزمكان، وتنشأ بنية الأشياء عن المعلومات المتبادلة التي تنسج العلاقات بين مناطق العالم، إنه عالم نعرف كيف نصفه بمجموعة معادلات، وربما تكون هذه المعادلات في انتظار التصحيح.

إنه عالم شاسع ما زالت أمور كثيرة فيه تحتاج إلى التوضيح والاستكشاف، وأحلم كثيرًا أن يتمكن شخص — من قراء الكتاب الشباب — من الإبحار في هذا العالم وإنارته على نحو أفضل، فوراء التل القادم توجد عوالم أكثر اتساعًا، وما زالت في حاجة إلى الاكتشاف.

المراجع

Andolfo, Matteo, *Atomisti antichi. Frammenti e testimonianze* (*Ancient Atomism. Fragments and Testominies*), Milan, Rusconi, 1999.

Aristotle, *On Generation and Corruption*, in *The Complete Works of Aristotle*, Vol. I. Ed. Jonathan Barnes, Princeton, Princeton University Press, 1984. The principal work by Aristotle which provides information on the thought of Democritus.

Bitbol, Michel, *Physical Relations or Functional Relations? A Non-metaphysical Construal of Rovelli's Quantum Mechanics.* Philosophy of Science Archives, 2007, http://philsci-archive.pitt.edu/3506/. Commentary on and Kantian interpretation of relational quantum mechanics.

Baggott, Jim, *The Quantum Story: A History in Forty Moments*. New York, Oxford University Press, 2011. A good and complete reconstruction of the main stages in the development of quantum mechanics, from its origin to the present day.

Bojowald, Martin, *Once Before Time: A Whole Story of the Universe*. New York, Alfred A. Knopf, 2010. An explanatory description of the application of loop quantum gravity to the origin of the universe – by one of the first scientists to use it in this way. Includes an account of the so-called 'Big Bounce' of the universe, which may have happened before the Big Bang.

Calaprice, Alice (ed.), *Dear Professor Einstein. Albert Einstein's Letters to and from Children.* New York, Prometheus Books, 2002. A delightful collection of letters exchanged between Einstein and several children.

Democritus, *Raccolta dei frammenti* (*Collected Fragments*). Interpretation and Commentary by S. Luria. Trans. It. Milan, Bompiani, 2007. There is no English translation of this classic edition.

Democritus, *The Atomists: Leucippus and Democritus. Fragments*. A text and translation with commentary by C. C. W. Taylor. Toronto, Toronto University Press, 1999. Diehls, H. and Kranz, W. (eds), *Die Fragmente der Vorsokratiker.* Berlin, Weidmann, 1903. The classic collection, in three volumes, of the 'fragments' of the Presocratics.

Dorato, Mauro, *Che cos'e il tempo? Einstein, Godel e l'esperienza commune.* Rome, Carocci, 2013. Precise and complete discussion, centred around special relativity, of the Einsteinian modification of the concept of time.

—, *Rovelli's Relational Quantum Mechanics, Monism and Quantum Becoming*. Philosophy of Science Archives, 2013, http://philsci-archive.pitt.edu/9964/. Discussion by an Italian philosopher of interpretations of quantum mechanics.

Fano, Vincenzo, *I paradossi di Zenone*. Trans. It. Rome, Carocci, 2012. An excellent study which highlights the topicality of the problems posed by Zeno's paradoxes.

Farmelo, Graham, *The Strangest Man: The Hidden Life*

of Paul Dirac, Quantum Genius. London, Faber, 2009. An extensive but highly readable account of the life and baffling character of the greatest physicist after Einstein.

Feynman, Richard, *The Feynman Lectures on Physics*, eds. Richard B. Leighton and Matthew Sands (3 vols.). London, Basic Books, 2011. Essential physics textbook drawn from the lectures of the greatest American physicist. They are brilliant, original, lively, the product of an outstanding intelligence. No student of physics who is truly interested in science should fail to read them.

Fölsing, Albrecht, *Albert Einstein: A Biography*. New York, Penguin, 1998. Extensive and complete biography of Einstein.

Gorelik, Gennaly E. and Frenkel, Victor, *Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties*. Boston, Birkhauser Verlag, 1994. Historical study of Bronštejn, the young Russian who initiated research in quantum gravity and was executed by Stalin.

Greenblatt, Stephen, *The Swerve: How the World became Modern*. New York, W. W. Norton, 2011. A book which reconstructs the influence of the rediscovery of Lucretius upon the birth of the modern world.

Heisenberg, Werner, *Physics and Philosophy* : *The Revolution in Modern Science*. New York, Harper & Row, 1962. The true originator of quantum mechanics reflects on general problems of philosophy and science.

Kumar, Manjit, *Quantum: Einstein, Bohr and the Great Debate about the Nature of Reality*. London, Icon

Books, 2009. A fine explanatory, detailed reconstruction of the birth of quantum mechanics and, above all, of the long dialogue between Bohr and Einstein on the meaning of the new theory.

Lucretius, *On The Nature of the Universe* (*De rerum natura*), trans. R. E. Latham. Harmondsworth, Penguin, 1951. The wonderful poem from which we know the ideas and spirit of ancient atomism.

Newton, Isaac, *A Treatise of the System of the World.* London, F. Fayram, 1731. A little- Known work by Newton in which he gives his theory of universal gravity in a much less technical form than in his great treatise (*Principia*).

Odifreddi, P., *Come stanno le cose. Il mio Lucrezio, la mia Venere*. Milan, Rizzoli, 2013. Translation with extensive commentary of Lucretius's poem. An ideal school textbook.

Plato, *Phaedo*, ed. David Gallop. Oxford, Oxford University Press, 2009. The oldest extant text to speak explicitly about the spherical nature of the earth.

Rovelli, Carlo, 'Aristotle's Physics: A Physicist's Look' in *Journal of the American Philosophical Association*, 1 (2015) 23–40.

—, *Seven Brief Lessons on Physics*, trans. Simon Carnell and Erica Segre. London, Allen Lane, 2015. A concise guide through the scientific revolution that shook physics in the twentieth century and still continues to shake us today.

—, *The First Scientist: Anaximander and His Legacy*, trans. Marion Lignana Rosenberg. Yardley, Westholme, 2007. A reconstruction of the ideas of Anaxi-

mander – one of the greatest scientists of all time – and their influence on the development of science. The book is also a reflection on the birth and nature of scientific thinking: its distinctive character, its difference from mythical thinking, its limitations and strength.

—, 'Quantum Gravity', in Butterfield, J. and Earman, J. (eds.), *Handbook of The Philosophy of Science, Philosophy of Physics*. Amsterdam, Elsevier/North-Holland, 2007, pp. 1287–330. A long article aimed at philosophers, with a detailed discussion of the current state of quantum gravity, of its unresolved problems and the various approaches to them.

—, *Quantum Gravity*. Cambridge, Cambridge University Press, 2004. Technical manual on quantum gravity. Definitely not recommended for anyone without a background in physics.

—, 'Relational Quantum Mechanics' in *The Stanford Encyclopaedia of Philosophy*, http://plato.stanford.edu/archives/win2003/entries/rovelli/. Synthesis of the relational interpretation of quantum mechanics.

—, 'Relational Quantum Mechanics' in *International Journal of Theoretical Physics*, 35 (1996), 1637, http://arxiv.org/abs/quant-ph/9609002. The article which first introduces the theory of relational quantum mechanics.

Smolin, Lee, *Three Roads to Quantum Gravity*. New York, Basic Books, 2002. An introduction to quantum gravity and its open questions.

Van Fraassen, Bas. 'Rovelli's World' in *Foundations of Physics*, 40 (2010), 390–417. A discussion of relational quantum mechanics, by an important analytic philosopher.

الملاحظات

الفصل الأول: المكونات الأساسية

1- On Anaximander and the Milesians, see Carlo Rovelli, *The First Scientist: Anaximander and His Legacy*, trans. Marion Lignana Rosenberg (Yardley, Westholme, 2007).

2- The Milesian origin of Leucippus is given, for instance, by Simplicius (see M. Andolfo, *Atomisti antichi. Frammenti e testimonianze* (*Ancient Atomism. Fragments and Testimonies*), (Milan, Rusconi, 1999), p. 103. But it is not certain. The reference to Miletus and to Elea is significant in relation to his cultural roots; the debt Leucippus owed to Zeno of Elea is discussed in the following pages.

3- Seneca, *Naturales questiones*, VII, 3, 2d.

4- Cicero, *Academica priora*, II, 23, 73.

5- Sextus Empiricus, *Adversus mathematicos*, VIII, 135 (trans. R. G. Bury *Against the Professors*), (Loeb Classical Library, 1989).

6- See Aristotle, *On Generation and Corruption*, A1, 315b 6, in *The Complete Works of Aristotle*, Vol. I, ed. Jonathan Barnes (Princeton, Princeton University Press, 1984).

7- A collection of ancient fragments and testimonies which speak of atomism is given in M. Andolfo's *Ancient Atomists*. A complete anthology of fragments and testimonies concerning Democritus has been published by Solomon Luria. (See entry 'Democritus' in the bibliography for an English alternative.)

8- For a brief and interesting recent work on the thought of Democritus, placing it in the context of humanism, see S. Martini, *Democrito: filosofo della natura o filosofo dell'uomo?* (*Democritus: Philosopher of Nature or Philosopher of Man?*), (Rome, Armando, 2002.)

9- Plato, *Phaedo*, ed. David Gallup (Oxford, Oxford University Press, 2009, XLVI.

10- Richard Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 1, eds. Robert Leighton and Matthew Sands (London, Basic Books, 2011).

11- See Aristotle, *On Generation and Decay*, A2, 316a, in *The Complete Works of Aristotle*, Vol. I, ed. Jonathan Barnes (Princeton, Princeton University Press, 1984).

12- A good recent account of Zeno's paradoxes, and of their philosophical and mathematical relevance, is given by Vincenzo Fano in *I paradossi di Zenone* (*Zeno's Paradoxes*), (Rome, Carocci, 2012).

13- *Amores* (Love Poems), I, 15, 23–4.

14- Lucretius, *On the Nature of the Universe*, trans. E. A. Latham, (Harmondsworth, Penguin, 1951), p. 173

15- Ibid., p. 89.

16- Ibid., p. 27

17- Ibid., p. 60.

18- Guido Cavalcanti, *Rime*., trans. Leonard Cottrell.

19- For an account of the rediscovery of Lucretius's text and its impact upon European culture, see Stephen Greenblatt, *The Swerve: How the World Became Modern* (New York, Norton, 2011).

20- See M. Camarota, 'Galileo, Lucretius and Atomism', in F. Citti and M. Beretta (eds.), *Lucrezio, la natura e la scienza* (*Lucretius, Nature and Science*), (Florence, Leo S. Olshki, 2008), pp. 141–75.

21- See R. Kargon, *Atomism in England from Hariot to Newton* (Oxford, Oxford University Press, 1966).

22- William Shakespeare, *Romeo and Juliet*, 1.4, 55–60, *Complete Works*, eds. Jonathan Bate and Eric Rassmussen (London, Macmillan/The Royal Shakespeare Company, 2007), p. 1690.

23- *On The Nature of the Universe*, pp. 63–4.

24- Piergiorgio Odifreddi has published a fine translation of and commentary on Lucretius's text, designed for use in schools. (*Come stanno le cose. Il mio Lucrezio, la mia Venere* (*The Nature of Things. My Lucretius, My Venus*), (Milan, Rizzoli, 2013). It would be wonderful if schools adopted this book and if this extraordinary text was more widely known. A reading of the text, and of its author, diametrically opposed to Odifreddi's is given by V. E. Alfieri in *Lucrezio* (*Lucretius*), (Florence, Le Monnier, 1929) and emphasizes the poignant, poetic qualities of the work, deriving from them a noble but bitter interpretation of the character of Lucretius.

25- H. Diels and W. Kranz,, eds., *Die Fragmente der Vorsokratiker* (*The Presocratics: Fragments*), (Berlin, Weidmann, 1903), 68 b 247.

الفصل الثاني: الكلاسيكيات

1- On the value of Aristotle's physics, see C. Rovelli, 'Aristotle's Physics: A Physicist's Look', in *Journal of the American Philosophical Association*, 1 (2015), pp. 23–40.

2- Iamblichus of Chalchis, *Summa pitagorica* (Milan, Bompiani, 2006). For an English translation, see Iamblichus, *Life of Pythagoras,* trans. Thomas Taylor (Vermont, Inner Traditions International, 1986).

3- Isaac Newton, *Opticks* (1704), (New York, Dover, 1979), p. 400.

4- Giacomo Leopardi, *The Canti, with a Selection of His Prose*, trans. J. G. Nichols (New York, Routledge, 2003), p. 53.

5- Isaac Newton, *Letters to Bentley* (Montana, Kessinger, 2010). Cited in H. S. Thayer, *Newton's Philosophy of Nature* (New York, Hafener, 1953), p. 54.

6- Ibid.

7- Michael Faraday, *Experimental Researches in Electricity* (London, Bernard Quaritch, 1839–55), 3 vols., pp. 436–7.

الفصل الثالث: ألبرت

1- Simplicius, *Aristotelis Physica* (*Aristotle's Physics*), 28, 15.

2- A. Calaprice, *Dear Professor Einstein. Albert Einstein's Letters to and from Children* (New York, Prometheus Books, 2002), p. 140.

3- The letter is quoted in A. Fölsing, *Einstein: A Biography* (London, Penguin, 1998), p. 337.

4- F. P. De Ceglia (ed.) *Scienziati di Puglia: secoli V aC.-XXI, dC, Parte 3* (*Scientists of Puglia : From the Fifth Century bc to the Twentieth Centuries, Part 3*) (Bari, Adda, 2007), p. 18.

5- A. Calaprice, *Dear Professor Einstein. Albert Einstein's Letters to and from Children* (New York, Prometheus Books, 2002), p. 208.

الفصل الرابع: الكموم

1- Albert Einstein, '*Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden Gesichtspunkt* ', *Annalen der Physik*, 17, pp. 132–48.

2- For a biography of Dirac which illustrates his disconcerting personality, see Graham Farmelo, *The Strangest Man: The Hidden Life of Paul Dirac, Quantum Genius* (London, Faber, 2009).

3- Lucretius, *On the Nature of the Universe*, trans. E. A. Latham, (Harmondsworth, Penguin, 1951), II, 218.

4- For a discussion of this relational interpretation of quantum mechanics, see 'Relational Quantum Mechanics' in the online *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, http://plato.stanford.edu/ archives/win2003/ entries/rovelli, or Carlo Rovelli, 'Relational Quantum Mechanics', in *International Journal of Theoretical Physics*, 35, 1637, 1996, http://arxiv.org/abs/ quant-ph/ 9609002.

5- Bas van Frassen, 'Rovelli's World', in *Foundations*

of Physics, 40, 2010, 390–417; Michel Bitbol, *Physical Relations or Functional Relations? A Non- metaphysical Construal of Rovelli's Relational Quantum Mechanics*, Philosophy of Science Archives, 2007, http://philsci- archive. pitt.edu/3506/; Mauro Dorato, *Rovelli's Relational Quantum Mechanics, Monism and Quantum Becoming*, Philosophy of Science Archives, 2013, http://philsci- archive. pitt.edu/9964/, and *Che cos'e il tempo? Einstein, Godel e l'esperienza commune* (*What is Time? Einstein, Godel and Shared Experience*), (Rome, Carocci, 2013).

الفصل الخامس: الزمكان كمي

1- The work on the measurability of fields by Niels Bohr and Leon Rosenfeld is '*Det Kongelike Danske Videnskabernes Selskabs* ', in *Mathematiks- fysike Meddelelser*, 12, 1933.

2- See Matvei Bronštejn, '*Quantentheorie schwacher Gravitationsfelder* ', in *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 9, 1936, 140–57; and '*Kvantovanie gravitatsionnykh voln* ', in *Pi'sma v Zhurnal Eksperimental'noi I Teoreticheskoi Fiziki*, 6, 1936, 195–236.

3- See F. Gorelik and V. Frenkel, *Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics* (Boston, Birkhauser Verlag, 1994). 'Bronstein' was also the real surname of Trotsky.

4- The episode is recalled by Bryce DeWitt, http://www.aip.org/ history/ohilist/23199.html.

الفصل السابع: الزمان غير موجود

1- Lucretius, *On the Nature of the Universe*, trans. E. A. Latham, (Harmondsworth, Penguin, 1951), p. 41.

2- William Shakespeare, *A Midsummer Night's Dream*, 5.1, 23–7, RSC edition, p. 403.

الفصل الثامن: ما وراء البيج بانج

1- The speech can be found on the Vatican website: http://www. vatican.va/holy_father/pius_xii/speeches/1951/documents/ hf_ p-xii_ spe_19511122_di-serena_ it.html#top.

2- See S. Singh, *Big Bang* (London, Harper Collins, 2010),p. 362.

الفصل الثاني عشر: المعلومات

1- A detailed discussion of these two postulates can be found in Carlo Rovelli, 'Relational Quantum Mechanics', in *International Journal of Theoretical Physics*, 35, 1637, 1996, http://arxiv.org/ abs/quant–ph/ 9609002.

2- Cicero, *Academica priora*, II, 23, 73.

الفصل الثالث عشر: اللغز

1- Cited in Diogenes Laertius, *Lives of Eminent Philosophers*, 2 vols., (New York, Loeb, 1989).

2- St Augustine, *Confessions*, XI, 12 (Harmondsworth, Penguin, 2002).

3- Mario Luzi, *Dalla torre*, in *Dal fondo delle campagne* (Turin, Einaudi) p. 214.

مكتبة
t.me/t_pdf

يقدم المؤلف الأفضل مبيعًا وفقًا لقائمة صحيفة نيويورك تايمز وصاحب كتاب «دروس سبعة موجزة في الطبيعة» نظرة أكثر قربًا على طبيعة الكون المحيرة للعقل.

ما هي المكونات الأساسية للكون؟ هل الزمان والمكان موجودان؟ وما هو الواقع بالضبط؟ بأسلوب أنيق وسلس يقودنا عالم الفيزياء النظرية كارلو روفيلي في رحلة مدهشة من ديموقريطوس إلى أينشتاين، ومن مايكل فاراداي إلى موجات الجاذبية، ومن الفيزياء الكلاسيكية إلى عمله في الجاذبية الكمية، وبينما يوضح لنا روفيلي كيف تطورت فكرة الواقع عبر الزمان، فإنه يقدم أيضًا تفسيرات أكثر عمقًا للنظرات التي قدمها بإيجاز في كتاب «دروس سبعة موجزة في الطبيعة»، يدعونا روفيلي إلى تخيل عالم مدهش ينقسم فيه الفضاء إلى حبيبات صغيرة، ويختفي فيه الزمان على المقاييس الصغيرة، وتوشك فيه الثقوب السوداء على الانفجار، إنه كون شاسع ما زال غير مستكشف إلى حد كبير.

«إنه عالم الفيزياء الذي يغير طريقة رؤيتنا للكون.»

صحيفة «فاينانشال تايمز»

كارلو روفيلي

عالم فيزياء نظرية إيطالي، ورئيس مجموعة الجاذبية الكمية في مركز الفيزياء النظرية في جامعة إيكس مارسيليا، روفيلي أحد مؤسسي نظرية الجاذبية الكمية الحلقية، ومؤلف كتاب «دروس سبعة موجزة في الطبيعة» الذي حقق أفضل مبيعات حول العالم وتُرْجِمَ إلى ما يزيد عن أربعين لغة، يعيش روفيلي في مارسيليا بفرنسا.